

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

INTERVENIR POUR RÉSOUDRE LES PROBLÈMES ENVIRONNEMENTAUX :
ESSAI SUR LA COMPRÉHENSION ET
LA MÉTHODOLOGIE DE L'INTERVENTION

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR
MÉLANIE LHÉMERY

FÉVRIER 2006

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

Il arrive toujours une heure où l'on n'a plus intérêt à chercher le nouveau sur les traces de l'ancien, où l'esprit scientifique ne peut progresser qu'en créant des méthodes nouvelles.

Gaston Bachelard

REMERCIEMENTS

Étudier à l'Institut des Sciences de l'Environnement s'est avéré une expérience enrichissante, tant du point de vue de l'apprentissage de connaissances nouvelles et interdisciplinaires que du point de vue relationnel avec les étudiants, les professeurs et les membres de l'Institut des Sciences de l'Environnement.

Je remercie sincèrement mon directeur de recherche, Monsieur Patrick Béron, Directeur à la Maîtrise en sciences de l'environnement et Professeur à l'Institut des Sciences de l'Environnement. Je tiens à souligner sa patience intarissable et son encadrement rigoureux qui m'ont permis de mener à terme cette recherche.

Je tiens tout particulièrement, à témoigner de la patience et du soutien inconditionnel de mon conjoint Élias Torres, qui m'a supportée et encouragée sans relâche tout au long de ma maîtrise.

Je remercie également Sabina Horr avec qui j'ai partagé les joies et les angoisses liées à la réalisation de ce mémoire; merci à Adeline Kilicaslan qui m'a donnée une belle impulsion de départ et qui a été présente également à la toute fin pour m'encourager et me conseiller et merci à Françoise Penven, pour qui la langue française n'a pas de secret.

Enfin, je remercie tous ceux et celles qui m'ont encouragée continuellement vers l'achèvement de ma maîtrise dont le parcours a souvent été parsemé de doutes.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
RÉSUMÉ.....	x
CHAPITRE I	
INTRODUCTION.....	1
1.1 De la lenteur des changements à la rapidité de l'accroissement des problèmes environnementaux.....	1
1.2 Pourquoi les changements sont-ils si lents?.....	2
1.3 Accélérer et améliorer le processus de résolution des problèmes environnementaux.....	4
CHAPITRE II	
AUTOUR DES NOTIONS DE PROBLÈMES, D'ENVIRONNEMENT ET DE RÉSOLUTION DE PROBLÈMES	6
2.1 Les problèmes environnementaux	6
2.1.1 Tout savoir sur le problème.....	6
2.1.1.1 Définition de la notion de problème.....	6
2.1.1.2 Les problèmes simples et compliqués.....	8
2.1.1.3 Les problèmes complexes	9
2.1.2 Autour du concept d'environnement.....	14
2.1.2.1 Définition du terme «environnement»	14
2.1.2.2 Le concept d'écosystème	15

2.1.3 Synthèse sur la notion de problème environnemental.....	20
2.2 Méthodologie pour le traitement des problèmes environnementaux.....	22
2.2.1 Itinéraire du traitement des problèmes environnementaux.....	23
2.2.2 De l'approche à la méthode systémique.....	28
2.2.3 La futurologie pour le traitement des problèmes environnementaux	32
2.2.3.1 L'extrapolation.....	33
2.2.3.2 <i>Le forecasting</i>	34
2.2.3.3 <i>Le backcasting</i>	35
2.2.4 Deux courants de pensée majeurs pour la résolution d'un problème environnemental	36
2.2.4.1 Le déterminisme.....	36
2.2.4.2 La prospective.....	37
CHAPITRE III	
CONSTRUCTION THÉORIQUE DU PROBLÈME ET DE LA SOLUTION.....	40
3.1 Vers une élaboration des typologies.....	40
3.1.1 Modélisation des problèmes environnementaux	40
3.1.1.1 L'exploration systémique.....	41
3.1.1.2 La modélisation dynamique	42
3.1.1.3 La modélisation qualitative	43
3.1.2 Typologie des problèmes environnementaux.....	46
3.1.3 Élaboration d'une typologie des solutions	51
3.1.4 Typologie des interventions	51
3.1.4.1 L'inaction totale.....	53
3.1.4.2 La relaxation.....	53

3.1.4.3 La restauration.....	53
3.1.4.4 La régulation.....	54
3.1.4.5 La maîtrise.....	55
3.1.4.6 L'asservissement.....	55
3.1.4.7 Méthodologie pour la mise en relation des deux typologies.....	57
CHAPITRE IV VERS LA GÉNÉRALISATION DU TRAITEMENT DES PROBLÈMES ENVIRONNEMENTAUX.....	58
4.1 Analyse des données.....	59
4.2 Un outil pour faciliter la prise de décision: la grille de synthèse.....	88
CHAPITRE V DISCUSSION	91
5.1 L'apport d'une grille de référence pour accélérer et améliorer le processus de résolution des problèmes environnementaux.....	92
5.1.1 Interprétation des résultats.....	92
5.1.2 Limites à l'interprétation des résultats.....	96
5.1.3 Recommandations.....	97
5.2 Limites de la recherche.....	98
5.3 Perspectives d'avenir.....	98
CHAPITRE VI CONCLUSION	99
APPENDICE A	103
GLOSSAIRE.....	106
RÉFÉRENCES.....	108
BIBLIOGRAPHIE	110

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 : Représentation d'un système d'après Karsky et Donnadiou (2002).....	17
Figure 2-2 : Itinéraire pour le traitement des problèmes complexes selon Crépin et Robin (2001).....	23
Figure 2-3 : Itinéraire pour la résolution des problèmes simples et compliqués selon Crépin et Robin (2001).....	24
Figure 2-4 : Itinéraire pour la résolution de problèmes selon Folger et Leblanc (1995).....	24
Figure 2-5 : La roue de Deming (Deming, 1988).....	26
Figure 2-6 : Les boucles IDAR	27
Figure 2-7: Étapes de la démarche systémique selon Karsky et Donnadiou (2002) (représentation partielle).....	30
Figure 2-8: Méthode de prévision selon une vision déterministe.....	36
Figure 2-9 : Méthode de prévision selon une vision prospective.....	38
Figure 3-1 : Élaboration du modèle de l'évolution de l'état de l'écosystème dans le temps	44
Figure 3-2 : Modèle hypersimplifié de l'évolution de l'état d'un écosystème dans le temps	45
Figure 3-3: Situations d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N ^{os} 1, 2, 3, 4, 5, et 6.....	47
Figure 3-4: Situations d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N ^{os} 7, 8, 9, 10, 11, et 12.....	48
Figure 3-5: Situations d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N ^{os} 13, 14, 15, 16, 17, et 18.....	49
Figure 3-6: Situations d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N ^{os} 19, 20, 21, 22, 23, et 24.....	50
Figure 4-1 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N ^o 1	59
Figure 4-2 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N ^o 2	61
Figure 4-3 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N ^o 3	63
Figure 4-4 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N ^o 4	65
Figure 4-5 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N ^o 5	66
Figure 4-6 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N ^o 6	67
Figure 4-7 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N ^o 7	68
Figure 4-8 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N ^o 8	69

Figure 4-9 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation :	
Cas N° 9	70
Figure 4-10 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation :	
Cas N° 10	71
Figure 4-11 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation :	
Cas N° 11	72
Figure 4-12 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation :	
Cas N° 12	73
Figure 4-13 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation :	
Cas N° 13	74
Figure 4-14 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation :	
Cas N° 14	75
Figure 4-15 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation :	
Cas N° 15	76
Figure 4-16 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation :	
Cas N° 16	77
Figure 4-17 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation :	
Cas N° 17	79
Figure 4-18 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation :	
Cas N° 18	80
Figure 4-19 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation :	
Cas N° 19	81
Figure 4-20 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation :	
Cas N° 20	82
Figure 4-21 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation :	
Cas N° 21	83
Figure 4-22 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation :	
Cas N° 22	84
Figure 4-23 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation :	
Cas N° 23	85
Figure 4-24 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation :	
Cas N° 24	86

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2- 1	Tableau comparatif des itinéraires à suivre pour la résolution de problèmes...	25
Tableau 4- 1	Synthèse des tendances d'évolution possibles de l'état de différents types d'écosystèmes suite à une perturbation continue et constante	88
Tableau 4- 2	Grille d'aide à la décision – Choix des interventions selon la nature de l'écosystème et selon l'évolution de son état dans le temps suite à une perturbation	89

RÉSUMÉ

Depuis la moitié du XX^e siècle, les écrits alarmistes n'ont cessé de se multiplier, avertissant des innombrables problèmes environnementaux qui menacent l'ensemble de la biosphère. Cinquante ans plus tard, ces écrits restent d'actualité. En effet, en dépit d'une certaine volonté de changer la situation (par exemple la signature du protocole de Kyoto sur les changements climatiques ou le développement de la gestion environnementale en entreprise), les changements demeurent trop lents par rapport à la rapidité de l'accroissement des problèmes environnementaux. De plus, la connaissance de la nature de ces problèmes demeure partielle du fait de leur complexité. Ajoutons que la complexification croissante des systèmes dans lesquels l'humain évolue (systèmes sociaux, systèmes écologiques, systèmes économiques) met au défi les scientifiques d'étudier et d'approfondir des phénomènes où interagissent une multitude de facteurs, où se combinent des principes de régulation et de déséquilibre, où se mêlent contingence et déterminisme, création et destruction, ordre et désordre. Dans un tel contexte, il semble difficile de résoudre un problème environnemental, sa complexité ne pouvant – par définition – être parfaitement connue.

Le but de cette recherche était d'accélérer et d'améliorer le processus de résolution de problèmes environnementaux.

L'objectif était de développer une méthodologie spécifique à la résolution des problèmes environnementaux en intégrant de nouvelles connaissances et en mettant l'accent sur l'élaboration d'un outil d'aide à la décision.

Pour ce faire, nous avons tout d'abord défini la notion de problème environnemental en intégrant un ensemble de connaissances qui lui sont liées, à savoir la complexité. Nous avons, ensuite, développé une méthodologie de la résolution des problèmes environnementaux en se basant, d'une part, sur la littérature existante de la résolution de problèmes (issue majoritairement des sciences de la gestion), et d'autre part, en intégrant les connaissances requises de l'approche et de la méthode systémique. Enfin, l'élaboration de cet outil s'est faite en développant et en confrontant une typologie des problèmes environnementaux et une typologie des interventions. Nous avons pu construire une grille de synthèse qui permet, ainsi, de faciliter la prise de décision en fonction de l'évolution d'un écosystème dans le temps et en fonction de la solution la plus adéquate.

Ces résultats montrent que l'élaboration d'une méthodologie apparaît essentielle pour améliorer le processus de résolution des problèmes environnementaux, de même que l'outil d'aide à la prise de décision, qui demande, néanmoins, à être amélioré.

De plus, certaines solutions seraient à privilégier parmi d'autres, puisqu'elles engendreraient une faible incertitude quant aux risques de conséquences non désirées sur le long terme. Ces résultats mettent également en avant la nécessité d'adopter une attitude plus prospective pour résoudre les problèmes environnementaux futurs, plutôt que de simplement réagir aux événements dans le présent.

PROBLÈMES ENVIRONNEMENTAUX – COMPLEXITÉ – MÉTHODOLOGIE – PROSPECTIVE –
RÉSOLUTION DE PROBLÈME

CHAPITRE I

INTRODUCTION

De remarquables résultats ont été obtenus en matière d'environnement au cours des dernières années. En effet, la couche d'ozone devrait s'être reconstituée au cours des cinquante prochaines années grâce au protocole de Montréal; la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques et le protocole de Kyoto sont les premières mesures internationales prises pour s'attaquer aux changements climatiques au niveau planétaire; l'opinion publique est, aujourd'hui, plus préoccupée par les questions d'environnement et, dans bien des pays, des mouvements populaires contraignent les autorités aux changements; les mesures - que nombre de grandes industries du monde entier ont adopté de leur plein gré - réduisent le volume des ressources utilisées et la production des déchets; le déboisement a été enrayé dans certaines régions d'Europe et d'Amérique du Nord où la tendance a même été inversée (PNUE, 2000). Et d'autres exemples peuvent encore être cités.

1.1 De la lenteur des changements à la rapidité de l'accroissement des problèmes environnementaux

Cependant, si toutes ces initiatives s'inscrivent sur le long terme, il n'en demeure pas moins qu'elles sont trop lentes par rapport à l'accroissement rapide des problèmes environnementaux et par rapport à la lenteur avec laquelle se reconstitue l'environnement. Non seulement cet accroissement se traduit par une expansion des problèmes dans l'espace - on parle en effet de détérioration de l'écosystème mondial et de bouleversements de l'équilibre écologique planétaire -; mais aussi, il se traduit par une expansion des problèmes

dans le temps, puisque l'on parle désormais de problèmes futurs et de possibilités à venir d'irréversibilité des écosystèmes.

Certes, le phénomène de mondialisation a largement contribué à cet accroissement. Traditionnellement perçue comme «un phénomène économique lié à l'apparence, au développement et à la consolidation du marché mondial» (Etherington, 2003), la mondialisation se caractérise par quatre grandes tendances : «une augmentation des flux de marchandises et de personnes; l'expansion et la diversification des activités financières; le développement des communications, des réseaux, du savoir et des relations; et l'accroissement des disparités» (Etherington, 2003). On peut dire, aujourd'hui, que la mondialisation est l'intensification au niveau planétaire des interrelations et interdépendances de tous les aspects de la vie des communautés, (commerce et industrie, finances, culture, religion, etc.). On comprend alors qu'elle influence directement le phénomène de croissance des problèmes environnementaux.

Au regard de ce qui vient d'être dit, il semble déjà peu probable que les ressources en eau à l'échelle planétaire, au cours des décennies à venir, permettent de pallier aux besoins des communautés; la dégradation de la forêt tropicale est bien trop avancée pour que l'on puisse prévenir l'irréversibilité des dommages, et de nombreuses générations seront nécessaires pour reconstituer les forêts disparues; bien des espèces de la planète sont déjà éteintes ou menacées d'extinction; il serait également difficile d'empêcher un possible réchauffement de la planète - résultat de l'accroissement des émissions de gaz à effet de serre -; de plus, bien des objectifs figurant dans le Protocole de Kyoto pourraient ne pas être atteints (PNUE, 2000).

1.2 Pourquoi les changements sont-ils si lents?

Dans un contexte si alarmant, il est possible de se demander pourquoi les changements sont si lents. Tout le monde s'entendra sur le fait que la résolution de problèmes environnementaux présente de nombreuses difficultés puisque, malgré les efforts fournis, la situation demeure préoccupante.

Il est possible d'avancer trois explications à ces difficultés :

- nous n'avons peut-être pas les moyens économiques ou techniques de les résoudre; en effet, résoudre les problèmes environnementaux demande avant tout des moyens économiques conséquents puisqu'il s'agit de mettre en place, par exemple, des mesures environnementales au niveau local, national et international; des mesures d'éducation relative à l'environnement ou des mesures pour aider les entreprises à modifier leurs processus de fabrication. Il est aussi envisageable que les moyens techniques fassent défaut, puisque, pour reprendre l'exemple des entreprises, cela suppose un changement basé sur l'innovation technologique;
- nous n'avons peut-être pas les connaissances, ni les méthodes nécessaires à leur résolution;
- nous ne sommes peut-être pas capables de prendre les décisions requises pour les résoudre.

Toutefois, il existe des alternatives pour mettre en place des solutions (développement de voitures hybrides permettant de limiter les émissions de gaz à effet de serre par exemple), même si elles représentent des défis techniques, mais surtout des défis socio-économiques. Mais il ne s'agit pas tant de ce manque de moyens techniques et économiques que du manque de connaissances, de méthodes ou l'absence de décisions qui nuisent à la résolution de problèmes environnementaux.

En effet, bien que l'accès à certaines connaissances sur les problèmes environnementaux soit évident, les scientifiques ont mis en avant la complexité de ces problèmes. Un problème complexe est une situation qui se définit principalement par un grand nombre d'interrelations dont la majorité ne peuvent être connues. De ce fait, les problèmes environnementaux ne peuvent être entièrement connus. Ce manque de connaissances constituerait donc une incertitude conséquente dans bien des domaines d'études et tout particulièrement en ce qui concerne l'avenir écologique.

D'autre part, il s'avère qu'il n'existe pas, dans la littérature, de méthodologie spécifique à la résolution des problèmes environnementaux. En ce sens, quelques interrogations émergent quant à la possibilité de les résoudre correctement.

Enfin, ne pas être capable de prendre une décision est compréhensible de par ce qui vient d'être dit. Cependant, il est possible de supposer que l'absence de décision soit liée à

l'incapacité à observer et à analyser les problèmes environnementaux à travers une vision macroscopique, c'est-à-dire moins locale, moins spécialisée et moins divisée. De plus, il faut faire face à l'incapacité à anticiper un problème : c'est-à-dire que l'on sait surtout réagir lorsque celui-ci survient dans le présent et lorsqu'il y a une contrainte à sa résolution. Mais l'intensification des menaces, qu'elle soit surestimée ou pire sous-estimée, oblige à prendre une décision. Il n'est pas envisageable de se contenter d'observer, de douter et d'attendre que la certitude s'impose d'elle-même. Il se présente des circonstances où des décisions doivent obligatoirement être prises, mêmes si celles-ci sont incertaines, comme l'illustre le cas des problèmes environnementaux futurs.

Ces trois explications (non exhaustives) sont des arguments liés aux façons de penser (penser globalement et moins spécifiquement, mais aussi penser dans la complexité) et aux façons de faire (adopter une méthodologie qui intégrerait ces façons de penser).

Compte tenu de ce qui vient d'être dit, est-il possible d'accélérer et d'améliorer le processus de résolution de problèmes environnementaux?

1.3 Accélérer et améliorer le processus de résolution de problèmes environnementaux

Le but de cette recherche est de proposer des outils qui permettraient d'accélérer et d'améliorer le processus de résolution de problèmes environnementaux dans le monde entier, tant au niveau local que global.

Ainsi, ces outils résulteraient d'une méthodologie qui tiendrait compte de trois aspects essentiels à l'accélération de la résolution des problèmes environnementaux :

- l'ensemble des connaissances liées à la théorie de la complexité;
- une vision plus globale et moins spécifique de la résolution de problèmes environnementaux;
- l'élaboration d'un outil d'aide à la prise de décision.

L'objectif est donc de développer une méthodologie de la résolution des problèmes environnementaux en intégrant un ensemble de connaissances spécifiques et en mettant l'accent sur l'élaboration d'un outil d'aide à la prise de décision.

En conséquence, il sera défini dans le chapitre 2, la notion de problème environnemental et les concepts qu'elle sous-entend, tels l'écosystème ou bien la complexité. Également dans ce chapitre, il sera présenté ce qu'est la résolution de problèmes environnementaux et la méthodologie qu'elle implique, attendu qu'il n'existe pas, dans la littérature, de méthodologie spécifique. Ensuite, l'objectif du chapitre 3 consiste à poser les bases nécessaires à l'élaboration d'un outil d'aide à la décision en proposant une typologie des interventions et une typologie des solutions. Lors du chapitre 4, la confrontation de ces deux typologies permettra la construction d'une explication à l'issue de laquelle sera créé un outil d'aide à la décision. Finalement, dans le chapitre 5, les résultats seront discutés, selon la faisabilité de l'outil. Si tel était le cas, des arguments seront mis en avant en fonction de sa crédibilité et de sa pertinence.

CHAPITRE II

AUTOUR DES NOTIONS DE PROBLÈMES, D'ENVIRONNEMENT ET DE RÉSOLUTION DE PROBLÈMES

Dans le but de déterminer si l'on peut faciliter le processus d'amélioration de résolution de problèmes environnementaux, il apparaît indispensable de définir la notion centrale de problème environnemental. En effet, celle-ci est composée de deux mots clés : la notion de problème qui, comme nous le verrons, distingue les problèmes simples et compliqués des problèmes complexes; puis la notion d'environnement qui nous emmènera vers la notion d'écosystème qui n'est autre qu'un type de système hyper complexe. L'implication de ces notions va favoriser l'introduction à la complexité, concept omniprésent tout au long de cette recherche.

Enfin, nous définirons le terme de résolution de problèmes environnementaux, avant de présenter une méthodologie.

2.1 Les problèmes environnementaux

2.1.1 Tout savoir sur le problème...

S'il est courant de parler de résolution de problèmes, il l'est encore plus d'utiliser le mot problème. Dans le cadre de la résolution de problèmes environnementaux, il est donc important de faire le point sur cette notion afin d'en cerner les limites.

2.1.1.1 Définition de la notion de problème

Du grec *problema*, le mot «problème» est un mot usuel et employé quotidiennement par toutes personnes confondues. Dans le dictionnaire Larousse (2003), deux sens sont donnés :

- Question à résoudre qui prête à discussion, dans une recherche.
- Difficulté qu'il faut résoudre pour obtenir un certain résultat; situation instable ou dangereuse exigeant une décision.

Cependant, le sens demeure trop vague. Tirées du dictionnaire philosophique (Clément *et al.*, 1994), trois définitions plus spécifiques peuvent être ajoutées :

- «Sens scientifique : question à résoudre à partir d'une méthode appropriée et de connaissances déjà acquises préalablement.
- Sens mathématique : difficulté à résoudre en déterminant une solution (inconnue) à partir d'un ensemble d'éléments (connus) formulés dans l'énoncé.
- Sens philosophique : Question d'ordre théorique ou pratique dont les enjeux sont décisifs et les solutions toujours discutables.»

Ces quelques définitions reflètent bien la difficulté de cerner la notion de problème : en effet, quelles en sont les limites? Sous des angles différents, ces trois définitions apportent chacune d'elles une réponse.

En effet, les problèmes environnementaux appellent à un sens de l'éthique, dépendamment si on le regarde à travers la doctrine conservatrice ou si l'on fait prévaloir les activités humaines sur la nature, laquelle n'est alors perçue que comme un instrument. L'éthique de l'environnement apparaît, en effet, comme une dimension centrale de par son intérêt pour l'étude des droits égaux de tous les êtres vivants et des devoirs que cela impose aux être humains (Prades, 1995).

Les problèmes environnementaux font appel, également, à la rigueur de la méthode scientifique et souvent, à des formules mathématiques pour leur résolution, pratique de plus en plus répandue pour notamment traiter les phénomènes complexes (voir section 2.1.1.3).

Cependant, il n'en demeure pas moins que plusieurs distinctions doivent être mises en avant pour expliquer ce qu'est un problème environnemental. En premier lieu, quel genre de problème est-ce? Est-ce un problème simple, compliqué ou complexe?

2.1.1.2 Les problèmes simples et compliqués

Il existe différents types de problèmes souvent classés en fonction de leur plus ou moins difficile résolution.

Crépin et Robin (2001), dans le cadre de la résolution de problèmes dans le domaine du management, appellent un problème simple «un problème pour lequel il est possible d'observer la situation "posant problème", et de recueillir à son propos des données chiffrées». Toujours selon eux, ces problèmes doivent répondre aux caractéristiques suivantes :

- ils peuvent être analysés et mesurés sous leurs différentes facettes;
- l'analyse permet d'établir des liens de causalité clairs, non ambigus;
- l'identification de la ou des causes et l'action adéquate sur ces causes permettent de résoudre entièrement le problème.

Les problèmes simples s'illustrent particulièrement bien lorsque l'on pense aux problèmes d'ordre technique.

Les problèmes compliqués ne diffèrent pas des problèmes simples si ce n'est dans le fait que le nombre d'éléments qui composent le problème est plus grand. Le travail est plus long, demande plus de réflexion et de rigueur; cependant, ils peuvent être entièrement résolus. «Comme dans le cas des problèmes simples, l'identification correcte des causes permettra d'apporter des solutions satisfaisantes et définitives» (Crépin et Robin, 2001). Cette affirmation n'est pas étonnante dans la mesure où les auteurs font référence – sans l'exprimer – au phénomène de la causalité linéaire. On dit d'une chaîne causale qu'elle est linéaire, lorsque n'y entrent pas en jeu les phénomènes de rétroaction, caractéristiques de la causalité circulaire à laquelle elle s'oppose. Ici, une cause A entraîne un effet B, lequel entraîne un autre effet C (Yatchinovsky, 2004). On peut dire de la causalité linéaire qu'elle est l'une des caractéristiques majeures de la définition des problèmes simples et compliqués.

Bien que ces types de problèmes aient pendant longtemps occupé les esprits, on a vu apparaître depuis le début du siècle dernier de nouvelles percées scientifiques qui ont bouleversé l'hypothétique ordre établi et la causalité linéaire de toutes choses, donnant ainsi naissance au concept de complexité.

2.1.1.3 Les problèmes complexes

Pour comprendre ce qu'est un problème complexe, il faut d'abord comprendre ce qu'est la complexité.

2.1.1.3.1 Prémisses d'explication de la complexité

Alors que ce qui apparaît comme compliqué fait état d'un grand nombre d'éléments, voici que l'une des plus importantes caractéristiques de la complexité relève de l'interaction entre ces nombreux éléments. Du latin *complexus*, le terme complexe signifie embrasser, englober, tisser. La complexité caractérise donc «la démarche d'un observateur qui cherche à embrasser un plus ou moins grand nombre d'éléments de différentes espèces formant un tout» (Donnadieu et Karsky, 2002). Le tout, le global, est le deuxième pilier de la complexité. Edgar Morin, la définit comme telle :

[...] ce qui est tissé ensemble et forme un tout dans lequel la somme des éléments qui composent ce tout est à la fois plus et moins que le tout [...]. La connaissance analytique des différents fils composant une tapisserie ne donnera jamais la connaissance de l'œuvre d'art dans sa globalité (Morin, 1977).

Voici une définition qui soulève de nombreux points (par exemple l'émergence d'un tout ou la remise en cause de la connaissance analytique) que nous expliquerons au fur et à mesure de l'avancement de la recherche.

Différents angles d'approche peuvent permettre l'explication de la complexité. Certains auteurs, par exemple, tels Ross Ashby évaluent la complexité par la variété. Gérard Donnadieu et Michel Karsky ont privilégié cette voie et l'explication suivante est largement basée sur leur ouvrage : *Penser et agir dans la complexité* (2002).

2.1.1.3.2 La variété

La variété, définie selon R. Ashby, est «le nombre d'éléments que comporte un système ou le nombre de relations différentes entre ces éléments ou d'états différents de ces relations» (de Rosnay, 1975, p.94). Toutefois, la variété résulterait beaucoup plus de la combinaison et de la richesse des relations entre les éléments que du nombre d'éléments composant un système. Par exemple, si l'on suppose un système composé de deux éléments : A et B, on peut envisager de multiples relations : il est possible que A et B s'influencent mutuellement ou qu'ils n'aient aucune influence l'un sur l'autre ou bien encore qu'ils exercent des influences unilatérales (A influence B, mais B n'influence pas A).

De plus, parmi toutes ces combinaisons possibles entre les éléments, il apparaît des régularités. L'ensemble des régularités d'un système est désigné par le terme de redondance. Cette dernière apparaît lorsque l'on peut retrouver au sein du système, des mêmes types de relations : certaines configurations peuvent être interdites (par exemple A ne peut jamais influencer B), tandis que d'autres peuvent être imposées sous forme répétitive (B influence toujours A). La redondance du système permet de connaître son fonctionnement et d'en énoncer des lois, des généralités.

Il est possible d'ajouter que plus la redondance d'un système est forte, plus la variété du système est réduite. En effet, le fait que les relations entre les éléments soient fixées (condition à leur connaissance), diminue les possibilités d'échanges entre ces mêmes éléments, entraînant de ce fait une diminution de la variété du système.

Ainsi, Ashby en déduit que, parmi tous les échanges possibles entre les éléments d'un système, si la redondance est maximale, cela signifie que la structure du système est parfaitement connu : il ne présente aucune complexité. Mais cela ne signifie pas pour autant qu'il soit simple, il peut être très compliqué (dépendamment du nombre d'éléments et des types de relations entre ces éléments). Inversement, si la redondance est nulle, c'est-à-dire que l'on ne peut reconnaître aucune régularité, ou n'identifier aucun type de relation; on ne peut rien dire du fonctionnement du système : aucune structure, aucune forme stable n'est alors reconnaissable dans le système, qui apparaît comme un pur produit du hasard. La variété est donc maximale, puisque toutes les configurations sont possibles (on parle d'équiprobabilité). Dans ce cas, la complexité n'existe plus.

2.1.1.3.3 L'ordre et le désordre

Mais la redondance exprime aussi qu'il existe un ordre, une loi et une organisation au sein du système. Si l'ordre est omniprésent (donc si la redondance est maximale), toutes les configurations sont connues et se répètent invariablement; la structure est donc entièrement fixée. Cela induit un autre fait : le jeu des éléments est prédéterminé; on connaît à l'avance ce qu'il va advenir des relations entre ces éléments.

À l'inverse, s'il n'existe que le désordre, le système est chaotique, désordonné, informe, etc. Il n'existe aucune structure, c'est le hasard. On parle donc d'un système aléatoire, dont le jeu des éléments n'est pas identifiable et dont les configurations ne peuvent être prévues.

On comprend alors que la complexité existe entre une redondance maximale et une redondance minimale, entre l'ordre et le désordre (Fortin, 2000).

2.1.1.3.4 La complexité n'est pas figée, elle s'étend

L'ordre fait appel à l'organisation et l'organisation à la diminution de la variété. Quand survient la diminution de la variété, on a tendance à penser que le système va se figer et c'est le cas dans un premier temps. Seulement, «l'organisation fait apparaître des possibilités relationnelles nouvelles entre sous-ensembles stabilisés d'éléments que l'on appelle sous-systèmes» (Donnadieu et Karsky, 2002). Se mettent alors en place de nouvelles relations entre sous-systèmes formant ainsi de nouvelles configurations, de nouvelles régularités, etc. Il y a donc un nouveau niveau d'organisation qui émerge. Ainsi, «cet accroissement de la richesse relationnelle permet à son tour de faire émerger dans le système des configurations nouvelles... d'où une augmentation correspondante de la variété et ainsi de suite» (Donnadieu et Karsky, 2002). Le jeu entre l'ordre et le désordre permet justement à l'ordre d'émerger : c'est l'auto-organisation. Et il permet d'assurer la survie du système et de son développement. On désigne ce phénomène par le terme de complexification. C'est bien de cette complexification qu'il s'agit lorsque l'on parle de l'évolution sociale et culturelle que l'on a brièvement introduite dans le chapitre 1.

Mais au-delà de cette auto-organisation ou de cette complexification, qui a le sens ici d'une "construction de constructions" au cours du temps, il existe un tout autre phénomène qui ne doit pas être confondu avec l'auto-organisation, bien que cela soit souvent le cas : c'est le principe d'émergence. Les propriétés émergentes sont celles qui relient, dans les deux sens, le niveau d'organisation "microscopique" au niveau 'macroscopique' qui l'englobe. Elles s'apparentent plus au hasard et font apparaître une rupture totale de causalité. Elles ne peuvent être expliquées.

L'émergence signifie que le tout n'est pas réductible à ses parties, il est plus (possédant des propriétés propres, surplombantes) et moins (il ne possède pas toutes les propriétés de ses parties, il y a perte d'information) (Zin, 2005). Ainsi, ces propriétés émergentes – encore mal connues aujourd'hui – ne sont absolument pas réductibles aux éléments en jeu, contrairement à l'auto-organisation et constituent une particularité indissociable de la complexité.

2.1.1.3.5 Système ouvert et système fermé

Pour comprendre ce mystère que l'on nomme complexité, de nombreux chercheurs de diverses disciplines ont apporté leur contribution. C'est le cas du Physicien Boltzmann qui a élaboré une relation capitale du point de vue de la connaissance des systèmes complexes, principe à partir du second principe de thermodynamique (voir appendice A). Il a établi une relation entre l'entropie et le désordre d'un système. Ainsi, selon lui, l'entropie maximum d'un système correspond à son désordre maximum. Compte tenu qu'un système évolue continuellement dans le temps, un système fermé va se désorganiser avec le temps. Ce second principe montre également qu'un système fermé soumis à des transformations irréversibles voit croître nécessairement son entropie. Donc, celui-ci évolue nécessairement vers le désordre. Cette argumentation sur les lois d'évolution des systèmes physiques permet à certains scientifiques, tel Carl Sagan, de dire que l'univers lui-même étant un système fermé, il ne peut évoluer que dans le sens de la croissance de l'entropie, soit vers le désordre général où toutes les configurations sont équiprobables.

Or, nous avons mentionné ci-dessus que la complexité existe entre l'ordre et le désordre et concerne des systèmes à la fois ouverts et à la fois fermés. C'est le cybernéticien Norbert

Wiener qui a établi la faculté d'un système complexe à contrôler son entropie par la rétroaction. Cette dernière est l'action d'un système suite à l'analyse des informations sur les résultats d'une transformation qu'il a opérée (Wiener, 1962). En d'autres termes, le système s'adapte continuellement en régulant lui-même l'énergie utilisée lors de ses transformations.

Donc, «dans un univers où l'entropie est nécessairement croissante, peuvent exister – pour un temps donné – des foyers locaux de complexification, cela pour autant que ces foyers empruntent de l'énergie et de la matière à leur environnement». (Donnadieu et Karsky, 2002) (voir section 2.1.2.2.2).

2.1.1.3.6 Synthèse sur les problèmes complexes

Bien loin d'avoir couvert les multiples dimensions de la complexité précédemment, Donnadieu et Karsky relèvent, toutefois, que celle-ci se traduit pour l'observateur par quatre caractéristiques principales. Ainsi pouvons-nous décrire un problème complexe comme un problème traitant d'une situation ou d'un système qui:

1- est flou et imprécis puisqu'il est impossible de déterminer avec précision ses dimensions et ses frontières de même que ses composants;

2- est empreint d'aléas et d'instabilité. Le désordre du système signifie que celui-ci est aléatoire. On ne peut déterminer à aucun moment ce qu'il va advenir. «L'ordre assure la permanence, la reproduction des structures de fonctionnement et le désordre ouvre la porte à la différence, à la remise en cause» (Donnadieu et Karsky, 2002). Voilà pourquoi la nature de ces systèmes est très instable;

3- est ambigu. On retrouve dans des situations complexes des éléments qui se comportent différemment selon les circonstances sans que l'on puisse expliquer pourquoi. Et on ne peut réduire ces logiques comportementales sous peine de détruire le système lui-même car le tout n'est pas égal à la somme des parties;

4- est incertain et imprévisible. Le fait que ces systèmes s'auto-organisent signifie que «sous l'influence d'événements ou de hasards parfois infimes, ils peuvent prendre des configurations inédites et tout à fait imprévues». Ainsi, «l'évolution se produit rarement de

façon régulière mais par des bifurcations qui provoquent de soudains changements d'états» (Donnadieu et Karsky, 2002).

Cette première explication de la complexité permet de comprendre un peu mieux le concept de problème complexe. Première, parce qu'il existe des objets complexes que l'on appelle des systèmes hypercomplexes (haut degré de complexité) tels les écosystèmes, qui ont des propriétés encore plus surprenantes que nous expliquerons dans la section 2.1.2.2.

La définition du mot problème et la classification des différents problèmes que nous venons ci-dessus d'évoquer dénotent bien la difficulté d'en cerner les limites. Maintenant que sont jetées les bases théoriques de la définition de problème, abordons la dernière étape de la définition de problème environnemental, à savoir la définition du second terme clé: l'environnement.

2.1.2 Autour du concept d'environnement

2.1.2.1 Définition du terme «environnement»

Tout comme la notion de problème, la notion d'environnement est une notion polysémique. Elle renvoie à des champs et des domaines complètement différents selon les disciplines ou les personnes qui utilisent cette notion. C'est depuis une quarantaine d'années que le terme a vraiment pris une signification importante dans le monde entier. Cela est précisément dû à la prise de conscience des menaces qui pèsent sur la Terre, conséquences possibles de la civilisation industrielle.

Le sens retenu ici et qui est le plus utilisé par la communauté scientifique est celui qui renvoie au milieu physique et biogéo-chimique dans lequel vivent les communautés humaines (Prades, 1995). Nous comprenons alors que cette définition intègre plusieurs disciplines (incluant les disciplines des sciences humaines et sociales) qui sont essentielles à la mise en lumière de toutes ses facettes. Pour cette raison, l'environnement est une notion interdisciplinaire (basée sur l'association de compétences).

Toutefois, nous ne nous attarderons pas sur cette notion puisqu'elle demeure trop vaste et, pour cette raison, nous ne l'utiliserons pas dans le sens qui vient d'être donné, même si l'on comprend bien qu'un problème environnemental est un problème relatif à une détérioration de l'environnement. Encore une fois, ce terme reste trop général pour bien saisir les limites de la notion de problème environnemental. Ainsi, lorsque désormais nous utiliserons ce terme, ce sera pour parler de l'environnement défini comme «ce qui entoure, ce qui est autour» (Larousse, 2003). Pour désigner un ensemble particulier de la biosphère, nous recourrons au terme d'écosystème.

2.1.2.2 Le concept d'écosystème

La notion d'écosystème est en effet une notion riche, de par tout ce qu'elle représente. Elle s'est imposée pour pallier la notion d'environnement et pour y intégrer la dimension de système. Un écosystème est littéralement défini comme la «maison de la vie». Mais J. de Rosnay souligne que la notion d'écosystème va bien au-delà de cette définition puisqu'il est régi par un ensemble d'interrelations constantes entre quatre composantes : l'atmosphère, l'hydrosphère, la biosphère et la lithosphère dont la finalité est de maintenir les grands équilibres de la vie. De cette manière, il peut s'apparenter à un organisme vivant (de Rosnay, 1975).

La richesse de cette notion lui vient de son suffixe «système». C'est un concept clé que l'on a évoqué à de nombreuses reprises - notamment lors de l'explication de la complexité - sans l'avoir au préalable défini. Pour bien saisir la notion d'écosystème, il est important de bien comprendre tout ce qu'implique la notion de système.

2.1.2.2.1 Qu'est-ce qu'un système?

Il n'existe pas une seule définition d'un système, mais plutôt un ensemble de définitions complémentaires les unes aux autres. Nous en avons retenu quelques-unes, les plus fréquemment citées dans la littérature. Ces définitions sont en partie reprises de l'ouvrage de Donnadiou et Karsky (2002).

Tout d'abord, Jacques Lesourne, dans *Les systèmes du destin*, explique qu'«un système est un ensemble d'éléments en interaction dynamique». Il introduit donc l'idée de complexité liée à la pluralité des éléments et à leurs interactions, mais également l'idée d'évolution, car l'équilibre d'un système est dynamique et ses parties ne sont pas inertes les unes par rapport aux autres (1974).

Ensuite, Edgar Morin dans *La Méthode*, apporte une autre précision : «Un système est une unité globale d'interrelations entre éléments, actions ou individus» (1977, t. 1).

Joël de Rosnay, lui, introduit le principe de la finalité propre aux systèmes biologiques en expliquant qu'«un système est un ensemble d'éléments définis en fonction d'un but». Il prend l'exemple d'une cellule vivante expliquant que son but «se constate a posteriori : maintenir sa structure et se diviser» (de Rosnay, 1975).

Finalement, une des définitions les plus complètes serait, selon Gérard Donnadiou et Michel Karsky (2002), celle de Francis Gallou (1992): «Un système est un ensemble, formant une unité cohérente et autonome, d'objets réels ou conceptuels (éléments matériels, individus, actions...) organisés en fonction d'un but (ou d'un ensemble de buts, objectifs, finalités, projets...) au moyen d'un jeu de relations (interrelations mutuelles, interactions dynamiques...), le tout immergé dans un environnement».

Joël de Rosnay (1975), que l'on vient de citer, affirme qu'aucune définition du mot système ne peut être satisfaisante, mais que seule la notion de système est féconde : elle apparaît sous ses deux aspects complémentaires : permettre l'organisation des connaissances et rendre l'action plus efficace. Ainsi, c'est la représentation d'un système qui lui donne toute son importance.

Voici la façon la plus commune de représenter un système:

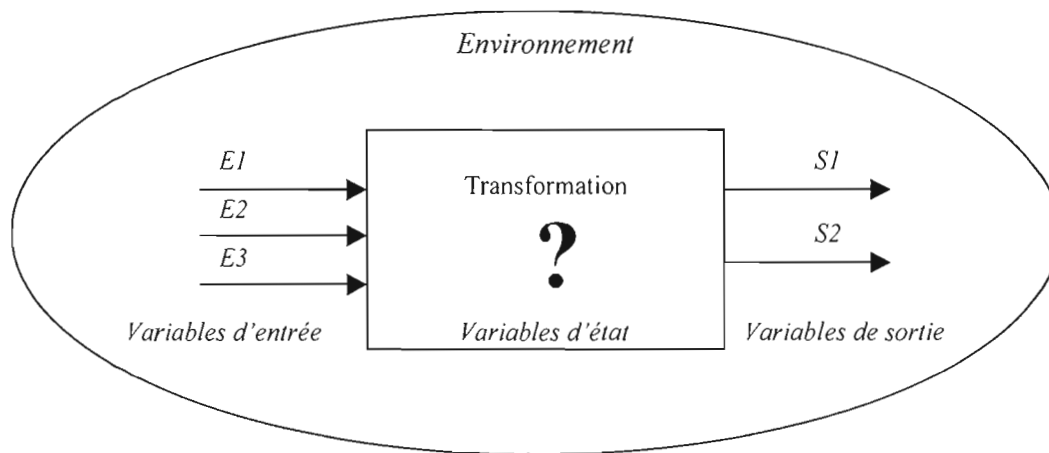


Figure 2-1 : Représentation d'un système d'après Karsky et Donnadiou (2002)

Un système est toujours situé par rapport à son environnement avec lequel il échange énergie, matière, informations, utilisés dans le maintien de son organisation contre la dégradation qu'exerce le temps. On identifie ces échanges par les variables d'entrée et les variables de sortie. Il se représente par une boîte noire. Celle-ci est le "cœur" du système où s'opère une transformation des variables d'entrée (issues de l'environnement du système) en variables de sortie. La transformation va également agir au niveau des variables d'état : l'état du système va changer. Un système est donc ouvert sur son environnement, condition à sa survie sans laquelle il « mourrait » à cause du phénomène d'entropie (l'entropie est l'énergie dégagée lors de la transformation). Toutefois, il n'est pas complètement ouvert puisqu'il est séparé de son environnement et c'est pour cette raison que l'on représente une frontière qui n'est pas toujours discernable dans la réalité (cette frontière n'est pas toujours physique telle la frontière d'un écosystème). L'environnement modifie l'état du système et, à son tour, le système modifie l'environnement. On peut décrire un système par son aspect structural : les éléments qui le composent et les sous-systèmes; mais également par son aspect fonctionnel : les relations ou les liens existant entre ces éléments et la façon dont ces relations sont en permanence régulées au service d'une même finalité (de Rosnay, 1975).

Il existe différents niveaux de complexité selon les systèmes. Les écosystèmes, par exemple, sont des systèmes dont le niveau de complexité est très élevé. Donnadiou et Karsky

(2002) les appellent Systèmes Hyper Complexes (SHC), de la même façon que Joël de Rosnay (1975) les a dénommés Systèmes de Haute Complexité. Ces auteurs expliquent que ces SHC se rencontrent quasi-exclusivement dans le champ du vivant et du sociétal. Ainsi, un écosystème serait un système hypercomplexe. On peut alors définir ces SHC par des caractéristiques qui vont venir clarifier la définition de système, d'écosystème et compléter la définition de complexité.

2.1.2.2.2 Les écosystèmes : des systèmes hypercomplexes

Six propriétés des systèmes hypercomplexes peuvent être énoncées :

1. Un SHC est un système clos et ouvert.

Un système ouvert permet – outre d'échanger énergie, matière et information nécessaires au maintien de son organisation – de maintenir son entropie à un niveau relativement bas. Un système fermé n'échange ni énergie, ni matière, ni information avec son environnement. Le système utilise sa réserve d'énergie interne pour opérer ses transformations. Mais à mesure du «déroulement des réactions, l'entropie s'accroît de manière irréversible. Lorsque l'équilibre thermodynamique est atteint, l'entropie est maximale et le système ne peut plus fournir de travail» (de Rosnay, 1975). Ainsi, un SHC fait partie de ces systèmes qui sont mi-ouverts, mi-fermés à leur environnement, ce qui leur permet de fonctionner tout en évacuant l'entropie qui cause leur destruction.

2. Un SHC se définit d'abord par ses relations.

Tel que nous l'avons mentionné auparavant, les SHC se définissent par le nombre et la nature des relations entre les éléments. Ce qui importe, c'est la connaissance de ces relations. C'est leur richesse qui fait apparaître des propriétés nouvelles. C'est le principe d'émergence : le tout est plus que la somme des parties.

3. Un SHC est arborescent.

Un SHC est un ensemble hiérarchisé en niveaux d'organisation. Certaines interrelations forment des sous-systèmes. À leur tour, les relations émergentes entre sous-systèmes forment un système plus englobant et ainsi de suite. C'est Herbert Simon qui a défini ces systèmes arborescents (de Rosnay, 1975).

4. Un SHC est finalisé.

La finalité est l'une des composantes essentielles d'un SHC. Il existe, en effet, une sorte de principe transcendant aux différents composants du système. Cette finalité se manifeste par diverses procédures de régulation qui ont pour objet de maintenir - dans la stabilité - le système sur sa trajectoire. Il existe différents types de régulation parmi lesquels la rétroaction. On peut retrouver des rétroactions positives sur lesquelles repose la dynamique du changement (le système amplifie l'effet d'un flux d'entrée) et des rétroactions négatives dites stabilisatrices – les plus importantes – où le système régule l'effet d'un flux d'entrée (Donnadieu et Karsky, 2002). Ce sont ces boucles de rétroaction négatives qui conduisent le système à un comportement adaptatif ou finalisé. On dit que le système a de fortes propriétés homéostasiques (capacités à maintenir les variables d'état stables) et homéorhétiques (capacités à maintenir les variables de flux stables) lorsque ses rétroactions négatives lui permettent de garder sa trajectoire.

5. Un SHC a besoin de variété.

Un SHC étant nécessairement ouvert sur son environnement, il doit s'adapter en permanence aux modifications que celui-ci occasionne. Cette adaptabilité ne peut exister que s'il y a une liberté suffisante au niveau des relations entre les divers composants. Cette liberté implique que ces comportements doivent présenter un certain flou et ne pas se laisser réduire à des déterminismes simples. C'est le principe de loi de variété requise énoncé par Ashby : chaque fois qu'un système n'est pas capable de puiser en lui cette richesse en variété, il perd progressivement ses capacités d'adaptation à l'environnement et se fragilise (de Rosnay, 1975).

6. Un SHC est auto-organisateur.

Enfin, les deux dernières caractéristiques - la nécessaire autonomie des éléments (5) cumulée à la nécessité de maintenir sans rupture l'organisation interne du système (4) - font naître la capacité auto-organisatrice du système. Ce mécanisme est en partie basé sur le mécanisme de rétroaction positive. Finalement, le système évolue, change tout en restant le même.

2.1.3 Synthèse sur la notion de problème environnemental

La définition d'un problème environnemental s'est essentiellement faite à travers une vision conceptuelle de la notion. Il est possible de s'entendre sur le fait que c'est une notion où les limites sont difficilement identifiables de par la nature même des deux mots qui la composent. En guise de synthèse, au regard de tout ce qui a été dit et sous un aspect un peu plus concret, nous pouvons énumérer quelques caractéristiques relatives à notre vision d'un problème environnemental.

1. Un problème environnemental, c'est d'abord la reconnaissance d'un système "pathologique".

Puisqu'il s'agit de milieux naturels, ceux-ci sont connus et définis comme évoluant dans une situation de stabilité que l'on peut appeler situation normale. La situation anormale représente alors une situation pathologique signifiant par là, que le système n'est pas en santé. Canguilhem explique d'ailleurs que «la maladie diffère de l'état de santé, le pathologique du normal, comme une qualité d'une autre, soit par présence ou absence d'un principe défini, soit par remaniement de la totalité organique.» (1966). Par exemple, un écosystème est dans un état pathologique lorsque son aspect structural ou fonctionnel est affecté. La situation normale et la situation pathologique sont déterminées en fonction des indicateurs de l'écosystème. Ces indicateurs sont le plus souvent issus de données quantitatives (milieu physique et biogéo-chimique) relevant des sciences exactes et sont comparés à la norme qui représente l'état de santé du système (c'est-à-dire l'état normal).

Néanmoins cela reste une norme. L'écart entre la situation normale et la situation pathologique représente alors un problème environnemental.

2. Un problème environnemental est nécessairement d'origine anthropique.

Ainsi, bien que le système puisse de lui-même provoquer sa situation pathologique, nous définirons un problème environnemental comme un problème essentiellement lié aux répercussions de l'activité humaine que l'écosystème n'est pas apte à réguler, perdant ainsi de sa variété. Ce dernier subit, de par son ouverture, les modifications de son environnement. Or, la notion de problème environnemental s'est imposée avec l'accroissement des menaces liées au développement de l'ère industrielle du XIX^e siècle.

3. Un problème environnemental est un problème subjectif.

La dimension humaine implique obligatoirement une dimension subjective. En effet, l'objet analysé ne fait pas état de normes claires : tout comme la santé humaine, selon qui ressent et qui évalue, le jugement se fait en grande partie par rapport aux présupposés et croyances du sujet. Ainsi, au-delà de la norme qui distingue l'état pathologique de l'état normal, un problème environnemental est d'abord un écart entre deux situations : une situation non satisfaisante et une situation satisfaisante. En effet, tout un spectre de courants de pensée s'immisce entre ces deux situations, allant des courants qui identifient la nature comme mystique aux courants qui considèrent les ressources naturelles comme une marchandise. Ces façons de penser déterminent souvent la prise de décision (Berque, 1996).

4. Un problème environnemental est un problème complexe.

Un écosystème étant un système hautement complexe, s'il évolue vers une situation pathologique, il représente alors un problème complexe. Autrement dit, un problème environnemental en tant que problème complexe ne peut être entièrement connu, ce qui constitue une difficulté majeure pour sa résolution. De ce fait, il ne pourra être entièrement résolu.

5. Un problème environnemental est un problème temporel.

Un problème environnemental ne saurait être défini en l'absence de la variable temporelle, c'est-à-dire que ce type de problème naît de l'écart entre une situation présente non désirée et un futur désiré ou d'une situation présente souhaitable et d'un futur non désiré. Cela s'explique par une dynamique particulière du temps dans l'évolution de l'écosystème. Celui-ci se transforme constamment et sa situation change avec le temps sans qu'on ne puisse vraiment la prédire avec certitude (système complexe).

6. Un problème environnemental est un problème interdisciplinaire.

Enfin, un problème environnemental est un problème interdisciplinaire, puisque chaque discipline est concernée de près ou de loin par les problèmes environnementaux. C'est un aspect important de la résolution des problèmes environnementaux comme nous le verrons un peu plus loin.

Maintenant que nous comprenons un peu mieux la notion de problème environnemental, nous verrons que la définition de résolution de problèmes environnementaux est simple, mais c'est la méthodologie qu'elle sous-entend qui présente quelques difficultés, à commencer parce qu'il n'existe pas de littérature spécifique sur le sujet. L'objectif de la section suivante consiste à développer les grandes lignes de la résolution de problèmes environnementaux, basées en partie sur des méthodologies générales existantes de résolution de problèmes (issues pour la plupart des sciences de la gestion), tout en tenant compte des spécificités d'un problème environnemental que nous venons d'évoquer.

2.2 Méthodologie pour le traitement des problèmes environnementaux

Compte tenu de ce qui a été dit précédemment, la résolution de problèmes est définie comme la correction de l'écart entre deux situations dans le temps : une situation normale/satisfaisante et une situation pathologique/non satisfaisante. La correction de cet écart nécessite une méthodologie particulière. Crépin et Robin la définissent tel «un

processus permettant d'aller, par étapes successives et avec rigueur, de l'identification d'un problème à sa résolution» (2001).

Comme nous l'avons mentionné, il n'existe pas de méthodologie propre à la résolution des problèmes environnementaux (d'ailleurs, le mot résolution ne serait pas approprié puisque par définition, il est impossible de résoudre un problème complexe, celui-ci ne pouvant être entièrement connu). Cette méthodologie peut être représentée par une liste d'étapes à suivre pour arriver aux résultats souhaités. Pour valider une étape et passer à la suivante, des outils sont généralement proposés selon la discipline ou le domaine particulier dans lesquels s'inscrivent le problème.

L'objectif de cette section est donc de chercher à établir l'itinéraire général des étapes à suivre pour traiter le problème environnemental et déterminer quels sont les types d'outils requis pour valider ces étapes.

2.2.1 Itinéraire du traitement des problèmes environnementaux

Dans leur ouvrage *Résolution de problèmes* (2001), Crépin et Robin proposent une méthodologie du traitement des problèmes complexes. Celle-ci a été élaborée dans le cadre des sciences de la gestion. Voici les étapes qu'ils suggèrent de suivre (p.38) :

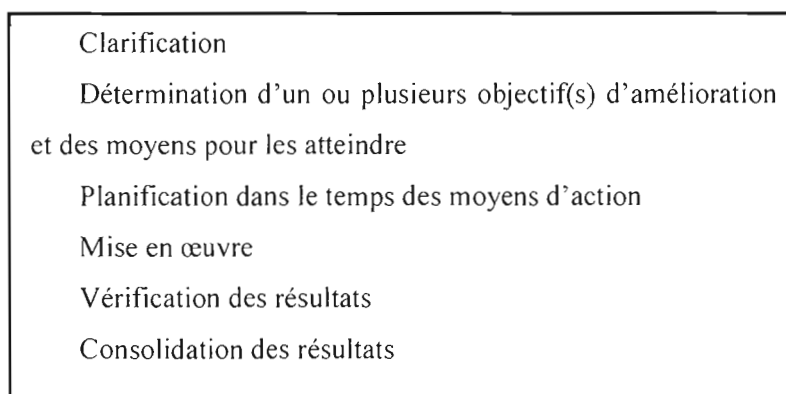


Figure 2-2 : Itinéraire pour le traitement des problèmes complexes selon Crépin et Robin (2001)

À simple titre de comparaison, examinons l'itinéraire qu'ils recommandent pour la résolution des problèmes simples (p.26) :

- Choisir un problème
- Poser le problème
- Rechercher et valider les causes
- Rechercher et choisir une solution
- Mettre en œuvre la solution
- Évaluer les effets de la solution
- Standardiser/généraliser la solution

Figure 2-3 : Itinéraire pour la résolution des problèmes simples et compliqués selon Crépin et Robin (2001)

On remarque rapidement que les étapes sont quasiment identiques. Regardons cette fois-ci un autre itinéraire proposé par Folger et Leblanc (1995) dans le cadre de la résolution de problèmes en ingénierie. Ceux-ci ne font par ailleurs pas de distinction entre les problèmes simples et les problèmes complexes :

- Définir le problème
- Générer des solutions
- Décider de la solution à implanter
- Implanter la solution
- Évaluer le résultat

Figure 2-4 : Itinéraire pour la résolution de problèmes selon Folger et Leblanc (1995)

Tout comme ces trois exemples, les itinéraires pour la résolution de problèmes sont semblables. Et pour cause : on retrouve dans chacun d'eux les quatre étapes fondamentales de

l'amélioration de la qualité élaborée par W.E.Deming dans les années 1950, comme l'illustre le tableau ci-dessous :

Deming Tous types de problèmes	Crépin et Robin Problèmes complexes	Crépin et Robin Problèmes simples	Folger et Leblanc Tous types de problèmes
PLANIFIER	Clarification du problème	Choisir un problème Poser le problème	Définir le problème
	Détermination d'un ou plusieurs objectif(s) d'amélioration et des moyens pour les atteindre	Rechercher et valider les causes	
	Planification dans le temps des moyens d'action	Rechercher et choisir une solution	Générer des solutions
			Décider de la solution à implanter
EXÉCUTER	Mise en œuvre de la solution	Mettre en œuvre la solution	Implanter la solution
VÉRIFIER	Vérification des résultats	Évaluer les effets de la solution	Évaluer le résultat
AGIR	Consolidation des résultats	Standardiser/généraliser la solution	

Tableau 2- 1 : Tableau comparatif des itinéraires à suivre pour la résolution de problèmes

Deming représente la résolution de problèmes par quatre étapes devant être exécutées en boucle. C'est, selon lui, le suivi du principe de l'amélioration continue qui permet la compétitivité de l'entreprise, l'anticipation des aléas du marché : il voit d'ailleurs l'entreprise comme un système ouvert sur son environnement.

Voici le schéma symbolisant la vision de Deming :

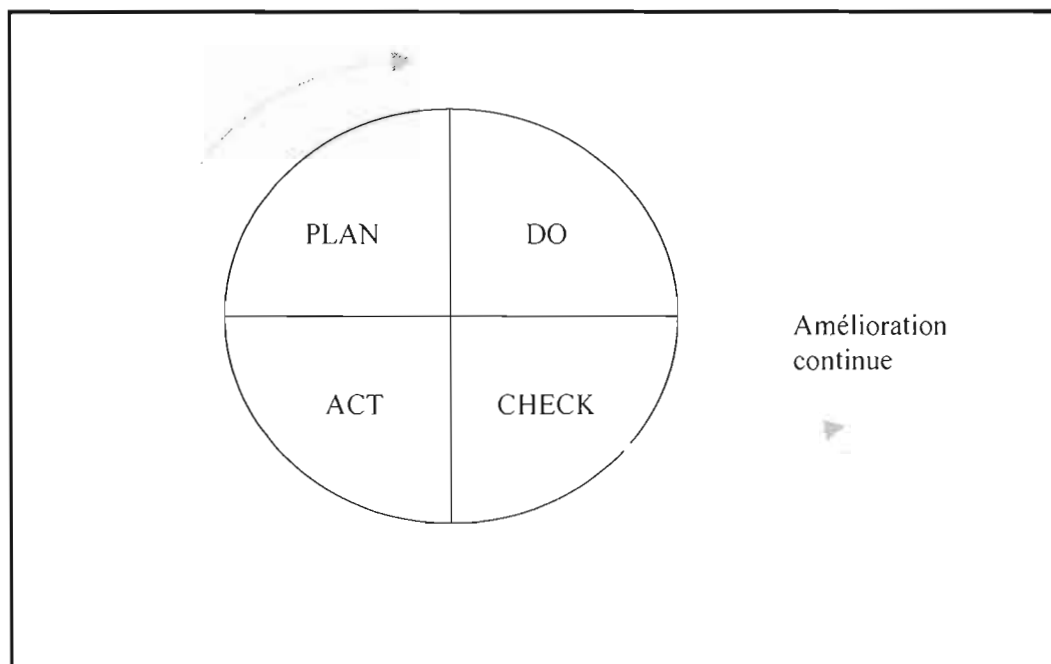


Figure 2-5 : La roue de Deming (Deming, 1988)

Cette vision se fonde bien avec la vision que l'on a des problèmes environnementaux. En effet, la définition d'un problème environnemental étant dépendante de son observateur (donc, subjective), il n'existe pas de limites clairement établies entre un écosystème normal et un écosystème pathologique (limites floues et variables). Ainsi, le principe d'amélioration continue vient effacer l'objectif d'atteinte de cette limite souvent normative pour la transformer en objectifs d'amélioration. D'autre part, la quatrième étape (ACT) laisse insinuer qu'elle prévoit les différentes possibilités de rétroactions non prévues du système, phénomène courant des systèmes complexes. Mais elle laisse sous-entendre également, la possibilité d'une erreur dans le choix de l'intervention tout comme la possibilité de corriger cette erreur. Cela ressemble de beaucoup, à la boucle élémentaire de la décision (IDAR) basée sur le même principe que la roue de Deming et élaborée en fonction du concept de système. Cette boucle élémentaire représente le pilotage d'un système complexe. Ce dernier doit articuler étroitement et en permanence : les informations acquises sur l'état du système et

de son environnement, la prise de décision proprement dite et les actions qui en découlent au niveau des organes de commande (Donnadieu et Karsky, 2002).

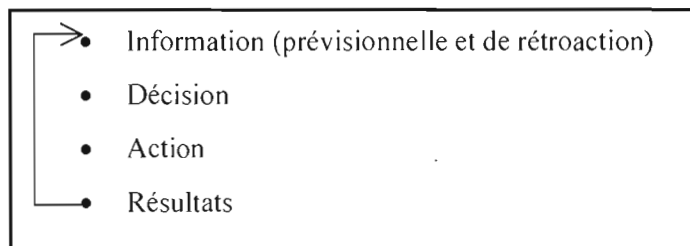


Figure 2-6 : Les boucles IDAR selon Donnadieu et Karsky (2002)

Ces boucles induisent le principe de l'amélioration continue en le représentant par l'étape des résultats. Les résultats vont en effet induire de nouvelles informations lesquelles vont permettre de rétroagir. La rétroaction, comme nous l'avons expliqué, est une notion clé d'un système. Elle consiste à corriger continuellement les changements qui s'opèrent au sein d'un système. Ainsi, ces boucles s'intègrent tout aussi bien à la résolution de problèmes environnementaux.

De fait, il semble tout à fait pertinent d'intégrer la roue de Deming au traitement des problèmes environnementaux tout comme les boucles IDAR représentatives du pilotage d'un système complexe.

Les itinéraires pour la résolution de problèmes sont sensiblement identiques, qu'il s'agisse de problèmes simples, compliqués ou complexes. Ce qui importe dans les étapes à suivre pour traiter un problème environnemental, c'est le principe de la continuité de l'intervention, puisque chaque intervention, chaque changement de l'écosystème engendrent un effet qui, à son tour, va modifier les conditions du problème: c'est la causalité circulaire.

La méthodologie pour la résolution de problèmes a initialement été développée suite aux recherches d'amélioration des ventes, de la qualité, de la productivité en entreprise. Cette recherche a été le leitmotiv de la résolution de problèmes dont de nombreuses disciplines se sont inspirées (ingénierie, sciences de l'éducation, sciences de l'environnement pour ne citer que celles-ci).

Au-delà de ces grandes étapes qui peuvent s'appliquer à plusieurs catégories de problèmes, ce qui distingue véritablement les méthodologies, ce sont les outils proposés qui permettent de valider ces étapes. Or, pour traiter d'un problème dont les relations sont nombreuses, les outils de l'approche systémique sont souvent privilégiés.

2.2.2 De l'approche à la méthode systémique

L'approche systémique est une approche parmi d'autres, dont le but ultime est l'étude des systèmes constitués par une très grande diversité d'éléments liés entre eux par des interactions fortes, bien qu'ils doivent être considérés dans leur totalité, leur complexité et leur dynamisme propre. Ainsi, l'étude du comportement d'un système dans le temps permet la définition de règles d'action permettant sa modification (de Rosnay, 1975). C'est dans la nature même de l'approche systémique d'avoir su développer sa méthode en même temps qu'elle construisait sa représentation et ses concepts.

Pour comprendre ou pour essayer de prévoir ses réponses, on représente le système par un modèle. Et pour représenter un système dynamique, les systémiciens ont recours à la simulation de ce même modèle. Joël de Rosnay insiste en affirmant que «la création de modèles et la simulation comptent au nombre des méthodes les plus largement utilisées par l'approche systémique, au point que, pour beaucoup, ils en constituent, en fait, l'essentiel» (1975).

Il définit d'ailleurs trois étapes nécessaires pour modéliser et simuler un système (De Rosnay, 1975) :

- l'analyse du système
- la modélisation
- la simulation

Donnadieu et Karsky reprennent ces étapes en les enrichissant (2002) :

L'exploration systémique consiste à définir les limites du système étudié, à bien le situer dans son environnement et à comprendre la nature et la raison des échanges qu'il entretient avec lui. Pour ce faire, l'outil privilégié est la triangulation systémique (présentée ci-dessous).

Une fois ces données acquises, il est possible de les représenter par un schéma en réseau, par un diagramme ou par une carte.

La modélisation qualitative s'appuie sur ces représentations et rassemble un ensemble de symboles, de normes, de méthodes nécessaires à l'élaboration de ces représentations.

La modélisation dynamique, enfin, consiste à introduire la dimension temporelle qui confère au système son aspect dynamique et peut déboucher sur différentes constructions suivant le cas étudié :

- soit la construction de modèles analogiques : le système étudié est remplacé par un autre système à la structure et au fonctionnement comparables, mais de nature différente;
- soit la construction de modèles numériques opérables sur ordinateur.

C'est cette modélisation dynamique qui rend possible la simulation du système représenté.

Voici l'itinéraire des étapes à suivre pour représenter le modèle étudié (figure 2.7 p. 30) :

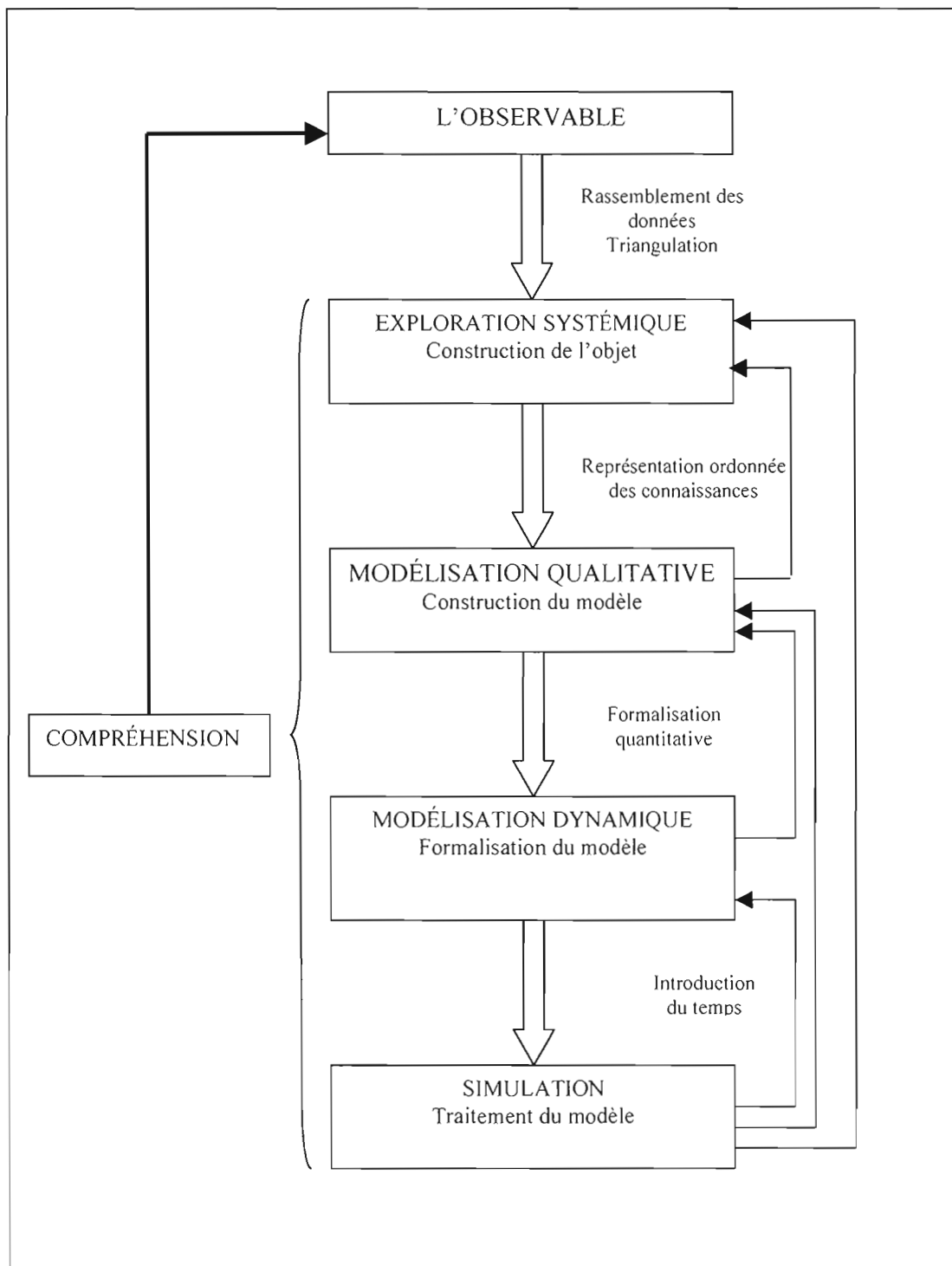


Figure 2-7: Étapes de la démarche systémique selon Karsky et Donnadiou (2002)
(représentation partielle)

Tels que nous avons commencé à les évoquer, il existe différents outils pour modéliser un système, parmi lesquels: la triangulation systémique, le découpage systémique et l'analogie. L'explication de ces outils est basée sur l'ouvrage de Donnadiou et Karsky : *Penser et agir dans la complexité* (2002).

1. La triangulation systémique

Elle est un outil indispensable à la phase de l'exploration systémique. Elle est basée sur le constat qu'un système complexe peut généralement être observé sous trois aspects différents, mais complémentaires.

- L'aspect fonctionnel vise à identifier la/les finalité(s) du système et de ses sous-systèmes en repérant leurs fonctions.
- L'aspect structural revient à décrire la structure du système, l'agencement de ses divers composants. Cette étape relève à première vue de la méthode analytique. Cependant, l'accent est mis sur la description des relations entre les composants plutôt que sur les composants eux-mêmes (plus sur la structure que sur l'élément).
- Enfin, l'aspect historique (génétique ou dynamique) est lié à la nature évolutive du système. Seule l'histoire du système permettra bien souvent de rendre compte de certains des aspects de son fonctionnement.

La triangulation systémique est la combinaison de ces trois aspects.

2. Le découpage systémique

Il est l'outil permettant la description de l'aspect structural du système et donc de ses relations entre les éléments. Pour réaliser ce découpage, la systémique propose quelques critères comme :

- le critère de finalité : décrire la fonction des sous-systèmes par rapport à l'ensemble du système;
- le critère historique : identifier l'aspect historique des composants des sous-systèmes;
- le critère du niveau d'organisation : situer le sous-système par rapport à la hiérarchie des niveaux d'organisation;
- le critère de la structure : identifier les structures qui se répètent.

3. L'analogie

Alors que ce raisonnement était mis de côté pour son rationalisme étroit, la systémique l'utilise beaucoup sous différentes formes :

- la métaphore : établir une correspondance entre deux phénomènes ou systèmes de nature différente;
- l'homomorphisme : établir une correspondance surjective entre quelques traits du système étudié et les traits d'un modèle théorique;
- l'isomorphisme : établir une correspondance bijective entre tous les traits de l'objet étudié et ceux d'un modèle. (Il s'agissait de la seule analogie acceptable dans une démarche analytique de type cartésien.)

La systémique reconnaît les risques de l'analogie. Toutefois, ces risques et ses modèles doivent être suffisamment simples pour comprendre et suffisamment efficaces pour agir.

Bien que la méthode ci-dessus soit loin d'être exhaustive, cet aperçu montre l'ouverture vers une nouvelle façon de faire, vers une nouvelle façon de penser.

Dans le cadre des problèmes environnementaux, nous verrons que la façon de penser semble déterminante pour agir. Mais tout d'abord, nous aimerions soulever un dernier point relatif à l'évolution d'un système. La modélisation, puis la simulation sont utiles pour comprendre l'évolution d'un système, mais aussi pour le prévoir. Pour résoudre un problème environnemental, la prévision de l'évolution de l'état de l'écosystème étudié est essentielle et détermine en grande partie le type de solution adéquat.

2.2.3 La futurologie pour le traitement des problèmes environnementaux

En effet, pour définir le problème environnemental, il est important de prévoir l'évolution de l'écosystème dans l'avenir : si la situation présente n'est pas satisfaisante, mais que la situation future montre que l'écosystème retrouve de lui-même un état satisfaisant, alors il n'est pas nécessaire _ voire utile _ d'intervenir; inversement, si l'état de l'écosystème dénote une situation présente satisfaisante, mais que son état dans le futur se dégrade, il faut

intervenir. La prévision d'un écosystème est un ensemble de données sur son état probable, sur le court, moyen et long terme. Également appelée futurologie, elle s'avère être un élément indispensable à considérer dans la méthodologie du traitement des problèmes environnementaux, puisqu'elle va orienter la prise de décision selon l'évolution future de l'écosystème. D'autre part, la prévision d'un écosystème se fait par différentes approches, lesquelles font partie intégrante d'une méthodologie pour la résolution des problèmes environnementaux présents comme futurs.

2.2.3.1 L'extrapolation

L'extrapolation est une méthode de prévision basée sur l'analogie de l'historique de la situation actuelle et la situation actuelle soit le présent. Elle consiste à déterminer le futur en extrapolant le présent et le passé à travers des lois connues qui viennent de l'observation du passé. L'extrapolation est un procédé de prévision qui s'inspire des sciences exactes. Lorsqu'un phénomène a été observé pendant un certain temps, «lorsque surtout on a pu donner à ses variations une expression numérique, on peut deviner la loi de son développement et prolonger au-delà du moment présent la courbe de son évolution future» (Berger, 1957). En effet, de l'observation du passé dans un domaine donné, certaines lois strictes ou universelles permettent d'établir des récurrences lesquelles permettent de projeter le futur. Elle renvoie donc sur le plan épistémologique, au fait qu'à tout événement peuvent être assignées une ou plusieurs causes produisant les mêmes effets. C'est, ici, le déterminisme qui pose comme principe la possibilité de formuler un lien tel qu'une ou plusieurs causes étant données, tel(s) effet(s) s'ensuit(vent) nécessairement (Clément *et al.*, 1994). Cette causalité linéaire implique qu'il serait possible d'expliquer les événements du présent à travers leur histoire. Et c'est vrai, puisque cette analyse apporte des informations explicatives essentielles à la situation actuelle. C'est donc avec ce même procédé que l'on peut établir des prévisions. Si tous les événements sont déterminés et s'expliquent grâce au passé, alors il est possible de prévoir ce qui va arriver dans le futur à partir du passé et du présent. Cependant, cette méthode ne peut être efficace que sur le court terme (l'efficacité ici est toute relative).

Pour résumer, l'extrapolation suppose que le futur ne peut être créé de toute pièces puisqu'il relève à part entière des facteurs du passé. Ainsi les choix du futur sont-ils restreints dans un cadre limité et contraints à part entière par le passé. D'ailleurs, Yatchinovsky, affirme que l'extrapolation s'appliquerait à des phénomènes réversibles (2004), alors que la complexité est justement caractérisée par la présence de phénomènes irréversibles.

Or, avec ce que l'on sait de la complexité d'un écosystème, comment peut-on continuer à utiliser un procédé de prévision uniquement basé sur l'historique du système et qui plus est, n'a de résultats probants que sur le court terme? Cette restriction du court terme a l'inconvénient de nécessiter des interventions dans l'urgence et souvent un retard s'accumule, dû à la vitesse d'évolution du progrès des sociétés et de leurs conséquences. De plus, avec les décisions immédiatement exécutables, l'engagement est souvent irréversible. Le risque est d'autant plus menaçant. Ces interventions dans l'urgence ont toutefois l'avantage de stimuler le perfectionnement de leurs procédés et permettent d'affiner leurs méthodes (Berger, 1957).

L'extrapolation est la méthode prévisionnelle la plus utilisée encore aujourd'hui : nous avons l'habitude de réagir aux événements. Cependant, elle reste dans certains cas le seul moyen de prévoir le futur comme l'illustre bien la météorologie (extrapolation du présent à travers certaines lois physiques connues). L'impression qu'elle donne d'un avenir écrit renvoie à très peu de possibilités de créer ou de modifier le futur.

Dans les études liées au management, les chercheurs ont vite compris ses limites et ont essayé justement de récupérer cette dimension de création du futur, tant celle-ci est essentielle à la gestion d'entreprises. Une nouvelle méthode s'est essayée, c'est le «forecasting».

2.2.3.2 Le *forecasting*

Le *forecasting* est une méthode qui permet d'envisager différentes possibilités de futur. Elle se base sur les données du présent et consiste à faire intervenir différents acteurs proposant leur vision du futur à partir de la situation présente (Paehlke, 1995). En ce sens, elle diffère de l'extrapolation qui vise à déterminer, en fonction des données du passé et du présent, la situation future qui arrivera obligatoirement. Le *forecasting* reconnaît l'imprévisibilité des événements futurs et inclut, de ce fait, un plus large éventail de

possibilités. Elle s'apparente à une méthode des scénarios et semble plus destinée non pas à implanter un nouveau futur, mais à prévoir ce qui pourrait arriver afin de s'y préparer dans le présent.

Cependant, ce que l'on reproche au *forecasting*, c'est qu'il se prépare aux événements futurs pour réagir dans le présent lorsque la situation se présentera. La résolution du problème reste donc réactive même si l'intervention ne se fait pas dans l'urgence.

Sur ces critiques, une nouvelle méthode a été élaborée pour combler ces manques : c'est le *backcasting*.

2.2.3.3 Le *backcasting*

Le *backcasting* est une méthode visant à créer un futur indépendamment des données du présent et du passé, bien qu'elle les utilise comme simple support informatif. Elle stimule la créativité et encourage la création d'un futur nouveau. Elle prône en quelque sorte la responsabilité d'un avenir (Paehlke, 1995). Le *backcasting* est tout à fait intéressant dans le cadre de la résolution de problèmes environnementaux puisqu'il permet de changer le futur en modifiant le présent. Ainsi, un problème environnemental, initialement prévu dans le futur, peut ne jamais arriver si le présent est modifié. La méthode est inversée comparativement à celles de l'extrapolation et du *forecasting*, puisqu'elle consiste, à partir d'un futur souhaité, à modifier le présent pour que le futur réel extrapolé (si l'extrapolation s'avère précise) soit le futur souhaité.

Ces trois méthodes, contrairement à l'apparence première de cette explication, ne sont pas à opposer. Elles sont des méthodes pertinentes lorsqu'elles sont utilisées à bon escient. Le *backcasting* est essentiel pour créer un nouvel avenir, le *forecasting* permet de mieux s'organiser face aux possibles événements et l'extrapolation est utile pour prévoir certains événements sur le court terme. Ces trois méthodes sont complémentaires. Il n'en demeure pas moins que le *backcasting* est encore trop peu utilisé en dépit de sa grande portée pour la construction de l'avenir comme, par exemple, la construction d'un développement durable. Plus souvent, c'est parce que nous ne savons pas l'utiliser, trop habitués à fonctionner dans un mode de pensée déterministe.

Ainsi, nous pourrions rassembler ces trois méthodes en deux courants de pensée, sans toutefois les y enfermer : l'extrapolation et le *forecasting* pourraient être adjoints à un courant déterministe, tandis que le *backcasting* renverrait plus à une attitude prospective.

2.2.4 Deux courants de pensée majeurs pour la résolution d'un problème environnemental

2.2.4.1 Le déterminisme

La notion de déterminisme est au fondement même de la physique. Elle affirme, en effet, qu'il est possible de formuler un lien tel que pour une ou plusieurs causes données, tel(s) effet(s) s'ensuit(vent) nécessairement (c'est la causalité linéaire dont nous avons parlé à maintes reprises). Dans ce contexte, elle s'oppose aux relations de causalité dues au hasard ou à la liberté des éléments (Clément *et al.*, 1994).

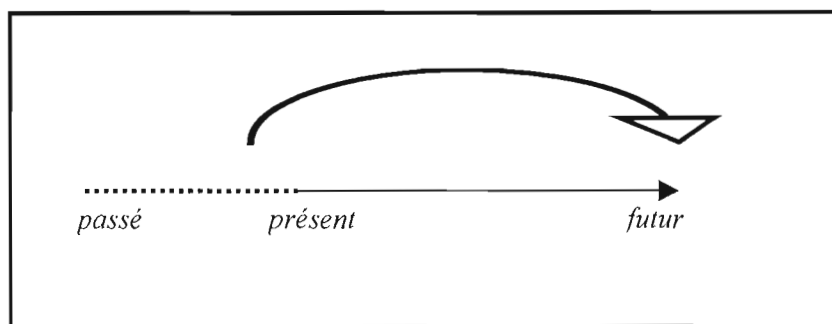


Figure 2-8: Méthode de prévision selon une vision déterministe

Au sens épistémologique, elle renvoie à un principe selon lequel, dans un domaine donné, à tout événement peuvent être assignées une ou plusieurs causes, les mêmes causes produisant rigoureusement les mêmes effets. On ne peut plus se prévaloir entièrement de ce mode de pensée aujourd'hui depuis qu'une branche de la physique (la thermodynamique) a mis en avant certains phénomènes dont l'observation directe est impossible ou ne permet pas de prédire les effets rigoureux d'un ensemble de causes (Clément *et al.*, 1994).

Présentée ainsi, l'extrapolation n'apparaît plus rigoureuse et semble très incertaine. Le *forecasting* s'est construit sur cette indétermination de certains phénomènes et a essayé – en

fonction de cette incertitude – d'intégrer le plus large éventail de conséquences possibles à partir des données du présent, mais continue paradoxalement à se rattacher à un avenir prédéterminé.

Basé sur ces constats, le *backcasting* ne s'inspire d'aucune façon d'une vision déterministe, au contraire, il s'inscrit dans un courant de pensée prospectiviste.

2.2.4.2 La prospective

La prospective est avant tout une attitude qui consiste à partir des futurs possibles ou souhaitables pour revenir au présent. Les tendances passées et présentes sont quand même utilisées, mais simplement «comme support à la réflexion» et «non comme une cage qui emprisonne le futur dans les limites du présent» (Berger, 1957). La prospective ne cherche pas à prédire et ne s'intéresse pas aux événements mais aux situations. Cette démarche a été pensée par Gaston Berger entre 1957 et 1960.

Elle suppose une vision à long terme exclusivement, dans le but de créer un nouveau futur, ce qui l'apparente à une théorie du changement. Mais son but n'est pas seulement la définition d'un nouvel avenir, c'est aussi la prise en compte des effets à long terme, compte tenu de l'évolution rapide des sociétés ces dernières décennies. Elle souhaite par là, anticiper les résultats du présent.

D'autre part, elle suppose une vision interdisciplinaire. En effet, la prospective incite à une vision large du monde dans lequel l'humain évolue, toujours dans le contexte d'un accroissement rapide des interdépendances entre les divers éléments qui composent les sociétés. Elle encourage les spécialistes à aller au-delà de leur vision étroite et à multiplier les recherches en équipes de plusieurs spécialistes.

La prospective réclame un travail approfondi qui ne cherche pas seulement les causes directes, mais également les causes profondes. «C'est à une analyse en profondeur que la prospective doit se livrer» (Berger, 1958). Elle recherche des facteurs vraiment déterminants et «des tendances qui poussent les hommes dans certaines directions sans toujours qu'ils s'en rendent bien compte» (Berger, 1958).

La prospective permet une plus grande liberté face au risque éventuel. En effet, elle suppose une liberté d'action et permet de prendre des risques qu'il sera possible de rectifier en cours de route.

Enfin, il est important de souligner que la prospective ne s'attache pas aux faits humains et seules les conséquences qui en découlent pour l'homme la préoccupe. Elle «implique de prendre une décision et un parti».

La prospective est un processus anticipatif. Elle élabore toutes les possibilités de l'avenir et encourage à arrêter de se laisser guider par l'évolution naturelle (en se laissant porter par le courant); elle suppose de profiter du courant pour aller ailleurs. Dans les cas de prospective, la démarche est inversée (on part du futur souhaité pour modifier le présent, tandis que le déterminisme part du passé et présent pour projeter le futur) et ne se fait pas pour les mêmes raisons.

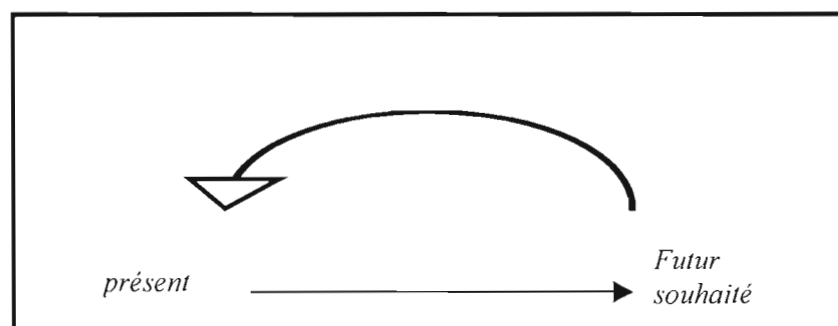


Figure 2-9 : Méthode de prévision selon une vision prospective

Que la situation présente soit souhaitable ou non, peu importe, c'est le futur qui nous intéresse et que nous avons déjà défini. C'est à partir de ce futur souhaité que le présent va être redéfini et complètement refait pour implanter cette situation désirée. Toutefois, la prospective peut être très risquée dépendamment des choix qui seront faits.

Bien que le discours déterministe soit de plus en plus l'objet de critiques, on continue de réagir aux événements. Toutefois, nous pouvons dire que ce mode de pensée et les méthodes relatives à la futurologie qui s'y appliquent est adéquat à la résolution de problèmes environnementaux qui se posent dans le présent, tandis que la prospective et ses méthodes (parmi lesquelles le *backcasting*) seraient à privilégier pour résoudre les problèmes du futur.

Au regard de tout ce qui vient d'être dit, nous comprenons mieux ce qu'est un problème environnemental, mais surtout ce qu'il implique comme connaissances pour être traité. Ces dernières apparaissent comme essentielles pour résoudre au mieux ces problèmes de plus en plus nombreux. Nous comprenons aussi, à travers toutes ces notions et concepts, qu'il est important de regarder de "plus haut" et de "plus loin", de sortir du particulier pour améliorer le processus de résolution de problèmes environnementaux.

Si l'on porte un regard de "plus haut" et de "plus loin" sur un écosystème par exemple, ne peut-on pas avancer que tout écosystème réagit de la même façon selon sa nature et selon la perturbation qu'il subit? Prenons deux exemples : le premier, un écosystème agricole et le second un écosystème lacustre. Si l'on suppose que :

1. l'introduction continue d'engrais chimiques dans un champ cultivé de maïs va stimuler la pousse sur le court terme, mais appauvrir le sol sur le long terme;
2. les rejets continus d'azote dans un lac vont stimuler la flore sur le court terme, mais asphyxier le lac sur le moyen et long terme;

alors, on peut affirmer qu'il serait possible d'identifier des types d'évolution de l'état des écosystèmes selon leur nature et la perturbation qu'ils subissent.

D'autre part, pour corriger ces situations qui risquent de représenter un problème dans l'avenir, on peut imaginer arrêter la perturbation (engrais ou rejets d'azote), ou modifier les doses ou introduire une nouvelle perturbation qui viendrait contrecarrer la première : reminéralisants pour les sols ou introduction d'une faune qui viendrait limiter l'expansion des plantes.

Dans ce contexte, peut-on affirmer que pour un même type d'écosystème, on retrouve un même type de solution?

Si tel était le cas, l'élaboration d'une grille de référence sur les types d'écosystèmes et les types de solutions, pourrait participer à l'accélération et l'amélioration du processus de résolution de problèmes environnementaux.

C'est ce que nous allons tenter de vérifier lors des chapitres qui vont suivre. Le chapitre 3 a pour but d'élaborer une typologie des types de réactions possibles d'un écosystème soumis à une perturbation anthropique, ainsi qu'une typologie des solutions.

CHAPITRE III

CONSTRUCTION THÉORIQUE DU PROBLÈME ET DE LA SOLUTION

Les bases théoriques étant circonscrites, il est maintenant possible de poser les bases opérationnelles nécessaires à l'élaboration d'un outil global pour améliorer le processus de résolution de problèmes environnementaux. Ainsi, l'objectif du chapitre 3 consiste à élaborer une typologie des problèmes environnementaux (créée à partir des différentes possibilités d'évolution de l'état de l'écosystème confronté à une perturbation), puis à élaborer une typologie des solutions que nous nommerons plus spécifiquement typologie des interventions. Nous déterminerons pour chacune des deux typologies les conditions à leur élaboration.

3.1 Vers une élaboration des typologies

Pour inventorier les types de problèmes environnementaux, nous utiliserons la modélisation, qui est l'outil privilégié de la systémique, puisqu'elle permet une lecture et une compréhension faciles du système représenté.

3.1.1 Modélisation des problèmes environnementaux

La construction de l'objet (ici un type d'écosystème) nécessite de choisir certaines variables clés à représenter. Or, compte tenu de la nature même de la recherche, qui est essentiellement théorique, les deux premières étapes de la démarche systémique (l'observable et l'exploration systémique) seront confondues. On ne peut, en effet, rassembler des données réelles basées sur l'observation d'un écosystème réel. Dans notre cas, nous expliquerons nos

choix concernant la représentation de l'évolution de l'état de l'écosystème, puis nous ferons de nouveaux choix quant à la structure de la représentation graphique du modèle.

3.1.1.1 L'exploration systémique

Nous allons nous baser sur les trois aspects de la triangulation systémique (tels que présentés dans le chapitre 2) comme point de départ pour construire notre objet. Ce qui nous intéresse, c'est que le modèle soit représentatif de tous les écosystèmes : fragiles, résilients, déjà «malades», avec de fortes ou faibles propriétés homéostasiques (capacités à maintenir son équilibre), etc. De plus, il doit traduire des situations de problèmes. Deux remarques peuvent être faites :

À première vue, comme il s'agit d'élaborer un modèle théorique général et que celui-ci ne s'appuie pas sur un cas concret, on ne peut pas expliciter sur l'aspect structural ou fonctionnel de l'écosystème.

D'autre part, pour que l'objet représenté traduise des situations de problèmes, il doit être représenté dans son contexte historique, sinon il n'apporterait pas suffisamment d'informations et, comme nous l'avons vu, un problème environnemental est dépendant de la variable temporelle.

C'est donc à travers l'aspect historique que nous allons construire notre objet. Cela permet de créer des mises en situation fictives dans le temps, de l'écosystème représenté.

En effet, si l'on introduit une variable X issue de l'environnement de l'écosystème, on peut imaginer pour ce dernier, toute une série de possibilités d'évolution de son état.

Ainsi, on peut se livrer à un ensemble de réflexions sur les potentielles réactions de l'écosystème exposé à la variable X. Et l'on peut, de ce fait, supposer quelques-unes de ses fonctions (fonctions très globales et très générales). L'aspect fonctionnel se trouve donc en partie réintroduit.

Les trois aspects de la triangulation systémique ne sont pas réunis ici. Cependant, il faut rappeler que l'on n'étudie pas un écosystème réel. On cherche plutôt à se livrer à un jeu

systemique permettant l'élaboration d'un modèle théorique. Ce dernier pourra éventuellement, dans de futures recherches, se vérifier sur un écosystème concret.

3.1.1.2 La modélisation dynamique

Pour construire notre objet et donc, un type d'écosystème, nous devons y intégrer l'aspect dynamique de son évolution. Nous le représenterons donc par l'introduction d'une perturbation et de la dimension temporelle.

3.1.1.2.1 La perturbation

Pour qu'il y ait problème, il faut qu'il y ait une perturbation anthropique d'après la définition que nous en avons donné dans le chapitre 2. Nous définissons la perturbation comme un ensemble d'informations issus de l'environnement de l'écosystème, qui va modifier ou non l'état de l'écosystème selon ses capacités intrinsèques à garder sa trajectoire. Pour rester le plus large possible, nous considérerons une perturbation continue dans le temps et constante en terme d'amplitude : c'est-à-dire que nous excluons les perturbations de type catastrophe qui sont d'une amplitude importante sur une échelle de temps petite et qui, de surcroît entraîne une variation brusque de l'écosystème. De plus, l'impact à court terme ne nous intéresse pas dans le cadre de cette étude.

C'est donc l'évolution de l'état de l'écosystème subissant l'influence continue de cette perturbation (depuis un moment précis dans le passé) ci-dessus décrite, que l'on va étudier.

3.1.1.2.2 Le temps

Tenir compte de l'aspect historique nécessite de connaître l'évolution passée de l'écosystème. La situation présente est importante puisque c'est dans le présent que sera implantée la solution. De plus, la représentation de l'évolution de l'état du système dans le

temps nécessite également d'intégrer une dimension future. Celle-ci est déterminante, car pour évaluer un problème environnemental et le corriger, il faut connaître les tendances d'évolution de l'écosystème. Par exemple, la situation présente peut être satisfaisante, mais le système peut révéler une situation future problématique. Inversement, si le modèle montre une situation présente non satisfaisante, il peut néanmoins montrer une tendance satisfaisante dans le futur.

Mentionnons enfin, qu'en tenant compte de la variable temporelle, on ne souhaite pas pour autant définir un espace temps; c'est-à-dire définir l'évolution de l'état du système dans un temps précis : on ne tient pas compte de la vitesse d'évolution du système.

Ainsi, sur l'échelle de temps du modèle, nous distinguerons deux zones distinctes qui seront plutôt définies comme des périodes de moyen à long terme (les systèmes naturels sont souvent caractérisés par des longs temps de réponse aux perturbations). Ces deux zones sont : passé/présent et présent/futur correspondant d'une part à l'histoire de l'écosystème (les données connues) et d'autre part à sa prévision.

3.1.1.3 La modélisation qualitative

La construction du modèle va s'opérer en deux moments : d'abord, il faut déterminer sa structure et ensuite intégrer l'aspect dynamique qui va lui conférer sa forme.

3.1.1.3.1 La structure

Un modèle théorique sans l'aspect structural ni fonctionnel (en partie), de même qu'une variable de perturbation non représentée directement, conduit à une représentation graphique épurée et donc à un modèle hyper simplifié. Pour représenter l'évolution de l'état de l'écosystème, deux variables sont nécessaires : l'état du système et le temps. Nous choisirons donc de construire un graphique avec deux axes majeurs:

- l'axe des abscisses correspondra au temps, en distinguant le passé, du présent et du futur. Nous mentionnerons également l'instant (t_i) correspondant à l'introduction de la perturbation;
- l'axe des ordonnées correspondra à "l'état" de l'écosystème. C'est ce dernier qui va nous informer de l'existence d'un problème ou non. Dans cette représentation, l'état dont il est question est symbolisé par une seule variable, tandis que dans la réalité, cet état renferme toutes les variables d'état de l'écosystème. Cet état n'a donc pas de valeur en tant que telle, puisqu'il s'agit bien plus d'un vecteur mathématique.
- De plus, pour juger d'un problème, il faut ajouter une valeur qui va marquer la frontière entre l'état satisfaisant ou acceptable du système et l'état insatisfaisant. Par convention, les valeurs au dessus de ce seuil définissent la zone d'acceptabilité.

Voici le modèle :

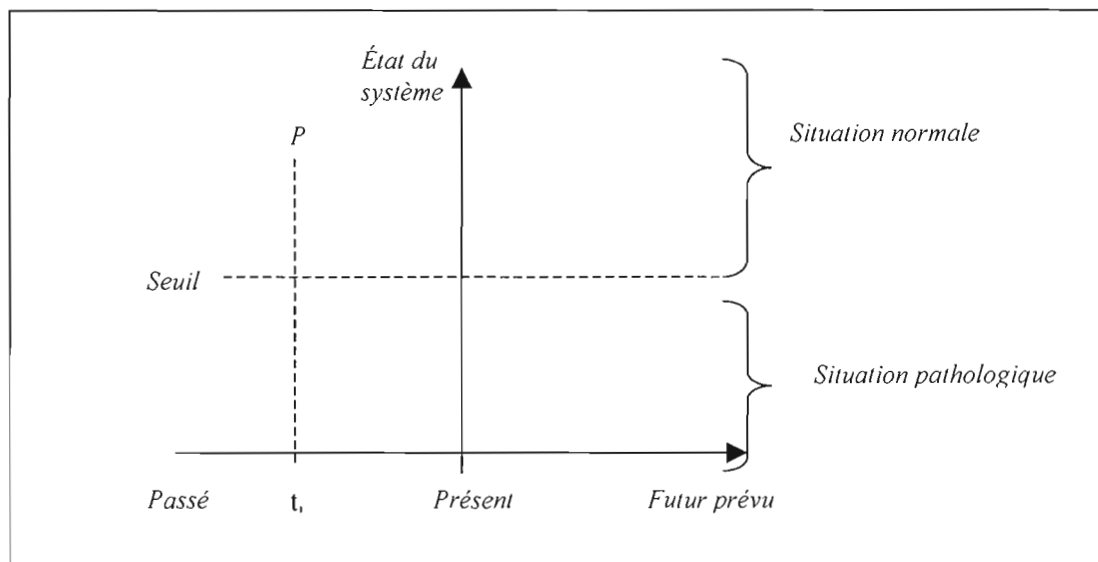


Figure 3- 1 : Élaboration du modèle de l'évolution de l'état de l'écosystème dans le temps

3.1.1.3.2 La forme

Il faut maintenant choisir le symbolisme qui va représenter l'évolution de l'état de l'écosystème et conférer au modèle un dynamisme. Nous allons représenter l'évolution naturelle d'un écosystème par une variation continue dans le temps, puisque nous avons exclu les possibilités de catastrophes (qui représentent les discontinuités de l'évolution naturelle de l'écosystème). Cependant, il doit être précisé que cette représentation ne limite pas l'évolution à une relation temporelle linéaire. Celle-ci peut être effectivement linéaire, mais aussi suivre n'importe quelle trajectoire, aussi variable soit-elle. Elle ne vise qu'à représenter une tendance globale.

Toujours dans l'optique de favoriser une lecture rapide du modèle, de représenter l'ensemble des écosystèmes et surtout parce que nous ne nous basons pas sur un écosystème réel, la droite représentera l'évolution de l'état de l'écosystème, bien qu'il existe différents moyens tels que la courbe, la droite, la sinusoïde ou la droite avec extrema. Et comme il s'agit de montrer une tendance dans le temps et donc une dynamique, nous ajouterons des flèches qui suivront le temps. L'évolution de l'état de l'écosystème sera caractérisée par deux droites fléchées pour marquer les deux zones distinctes : passé/présent et présent/futur.

Voici un exemple de la représentation d'un problème environnemental issu d'une modélisation hyper simplifiée :

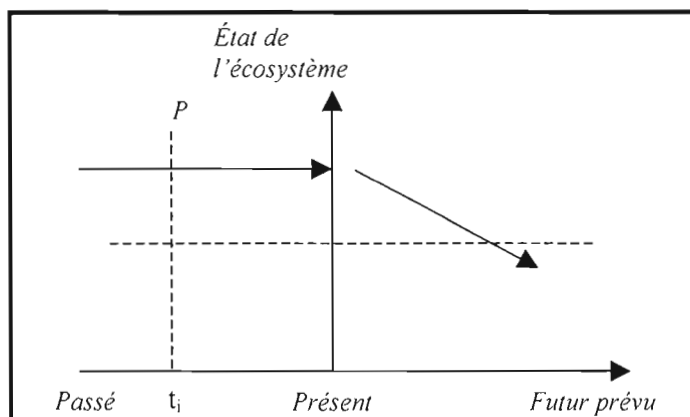


Figure 3- 2 : Modèle hypersimplifié de l'évolution de l'état d'un écosystème dans le temps

3.1.2 Typologie des problèmes environnementaux

Maintenant que la préparation à la typologie des problèmes environnementaux est effectuée, il est possible de représenter les différentes possibilités d'évolution de l'état de l'écosystème soumis à une perturbation dans le temps.

Rappelons que l'élaboration de ce modèle hyper simplifié a pour but de simuler les différents états possibles (souhaitable, non souhaitable et acceptable) d'un écosystème soumis à une perturbation (ou un ensemble de perturbations) continue et constante dans le temps.

Cette simulation s'opère dans le temps en observant depuis le passé - et surtout depuis le moment de l'introduction de la perturbation – les différentes réactions possibles de l'écosystème.

Nous excluons de notre interprétation les explications relatives aux fluctuations naturelles de l'écosystème. Par exemple, il se peut que l'écosystème se mette de lui-même dans un état d'homéostasie pathologique, c'est-à-dire qu'il va utiliser ses boucles de rétroaction négatives (stabilisatrices) pour se maintenir dans un état pathologique. C'est un cas qui peut se retrouver dans tout système vivant, mais que nous excluons de notre explication future.

Enfin, l'objectif de cette explication est en fait d'étudier la relation entre l'évolution de l'écosystème et la perturbation qu'il subit et de recommander une intervention.

Vingt-quatre situations ont ainsi été créés :

Tout d'abord, pour la première période (passé/présent), il y a six possibilités d'évolution :

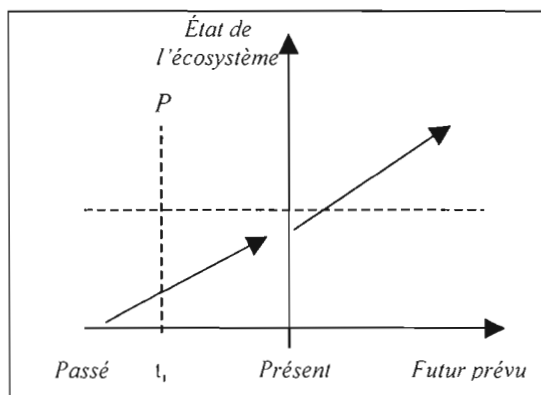
- amélioration au dessus et au-dessous du seuil
- stabilisation au-dessus et au-dessous du seuil
- dégradation au-dessus ou au-dessous du seuil

Pour la deuxième période présent/futur, quatre tendances sont possibles :

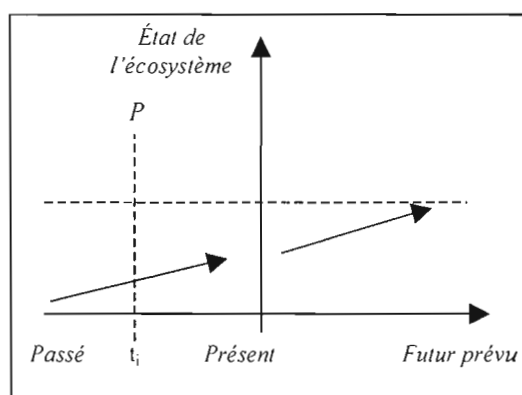
- amélioration (droite monte)
- stabilisation (droite stable)
- dégradation (droite descend)
- la dernière tendance est liée au seuil d'acceptabilité. En fonction du départ de la première période, on traverse ou on ne traverse pas le seuil.

Voici les vingt-quatre situations :

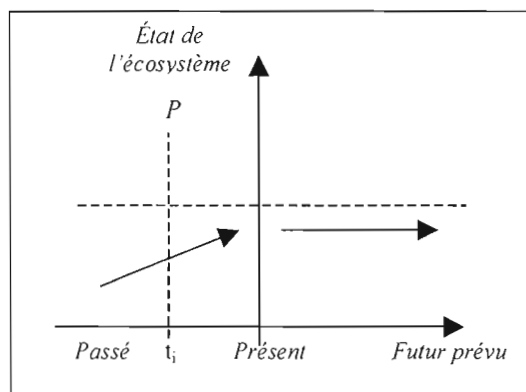
CAS N° 1



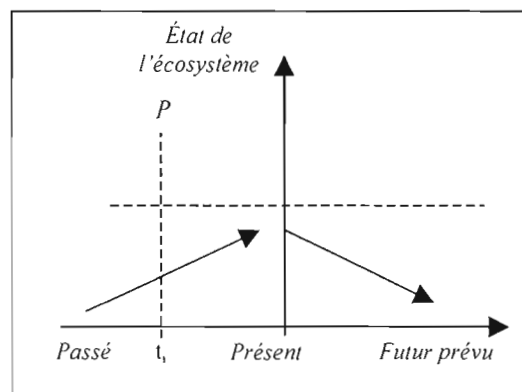
CAS N° 2



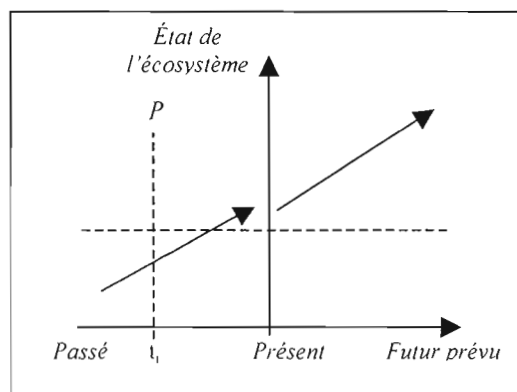
CAS N° 3



CAS N° 4



CAS N° 5



CAS N° 6

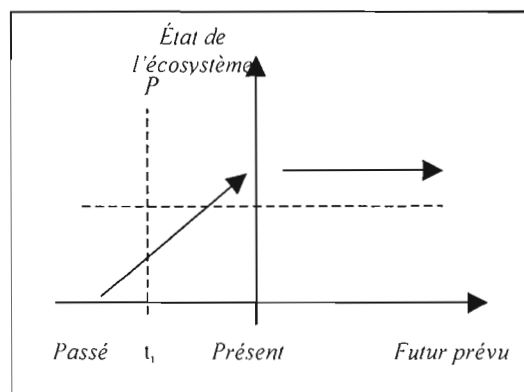
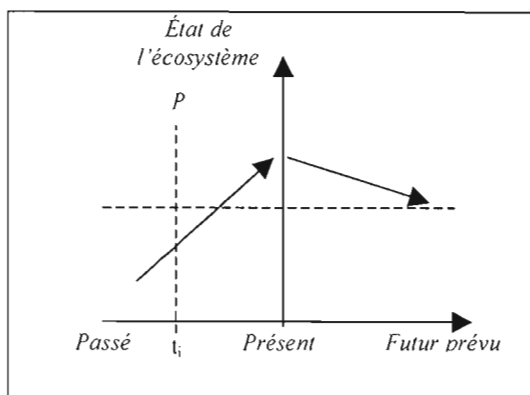
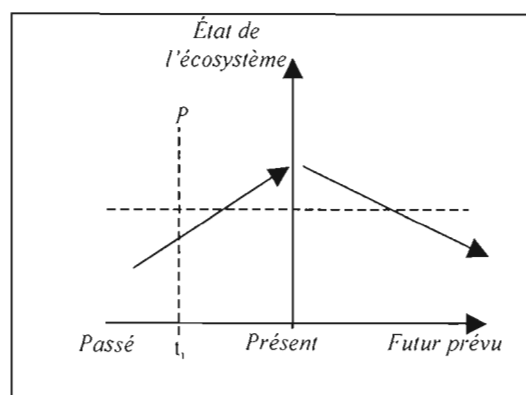


Figure 3-3: Situations d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation :
Cas N°s 1, 2, 3, 4, 5, et 6

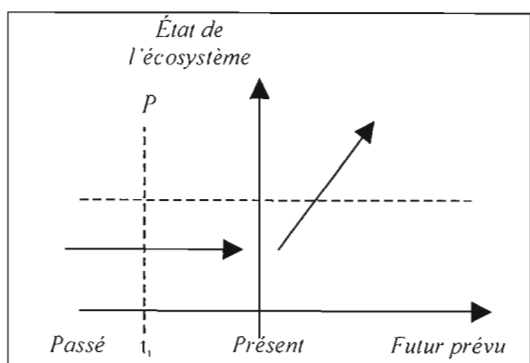
CAS N° 7



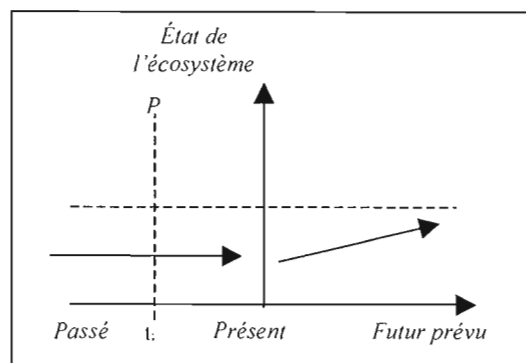
CAS N° 8



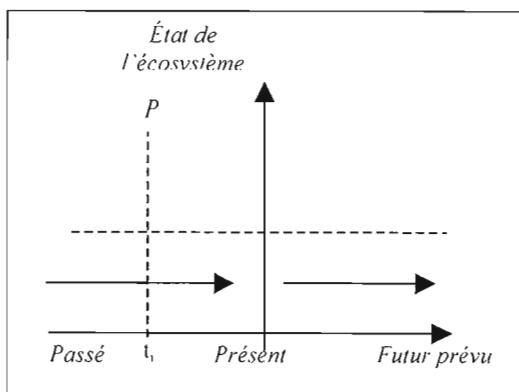
CAS N° 9



CAS N° 10



CAS N° 11



CAS N° 12

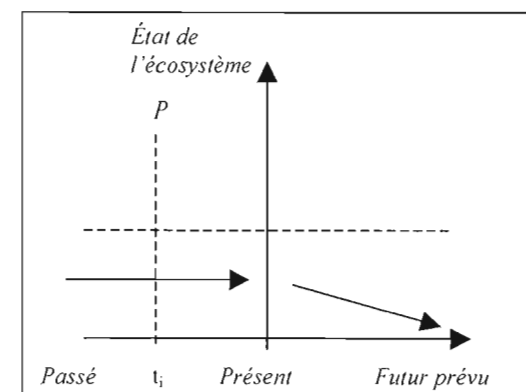
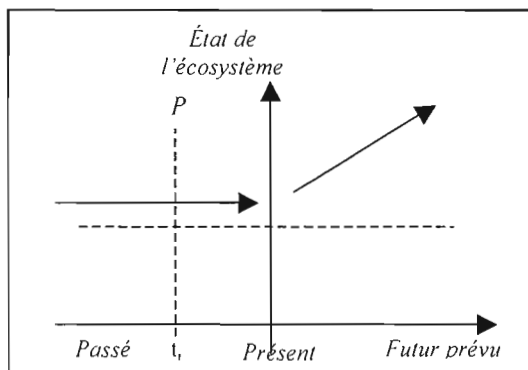
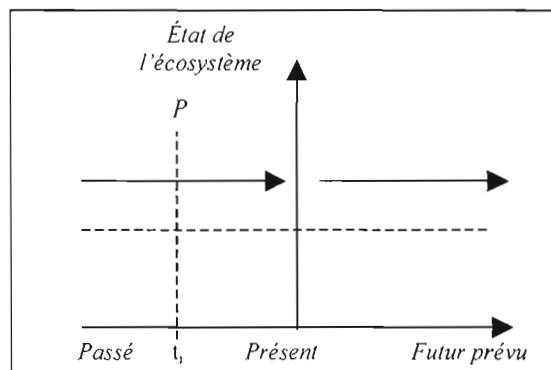


Figure 3-4: Situations d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N° 7, 8, 9, 10, 11, et 12

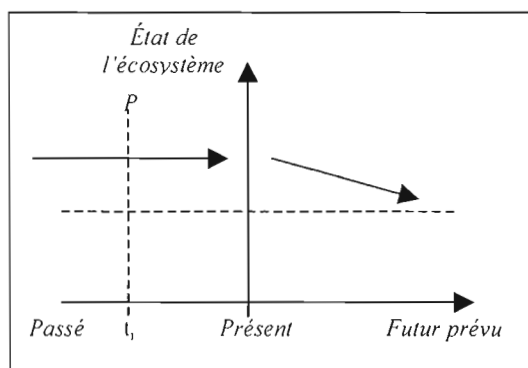
CAS N° 13



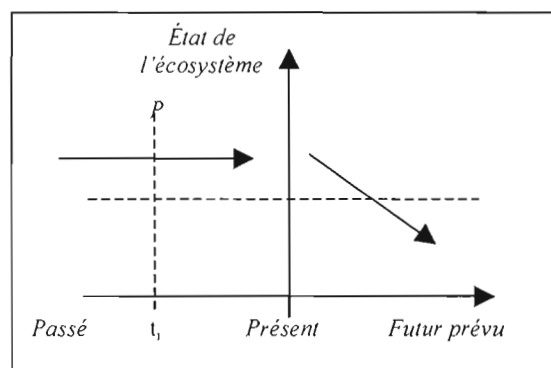
CAS N° 14



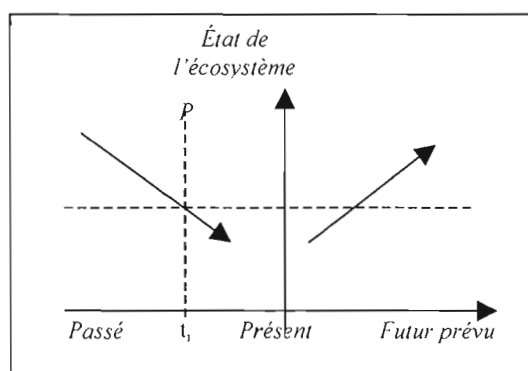
CAS N° 15



CAS N° 16



CAS N° 17



CAS N° 18

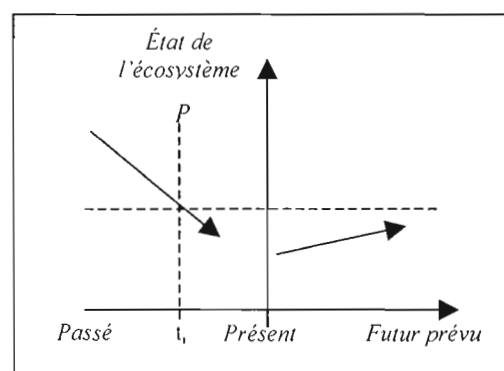
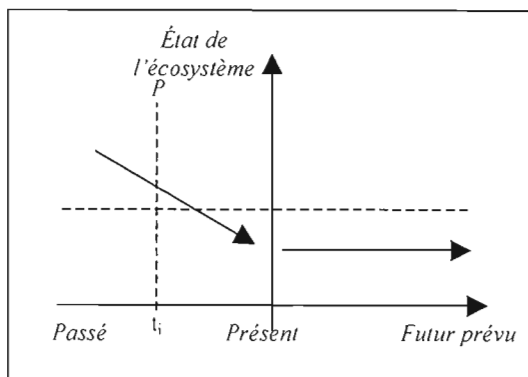
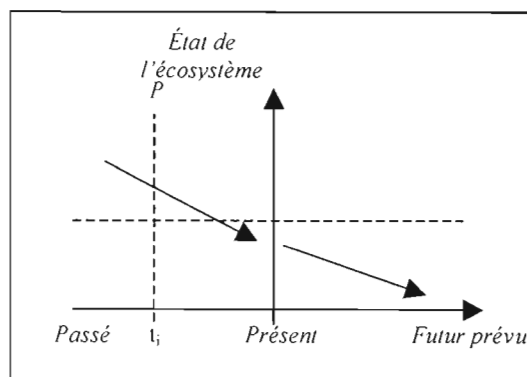


Figure 3-5: Situations d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation :
Cas N°s 13, 14, 15, 16, 17, et 18

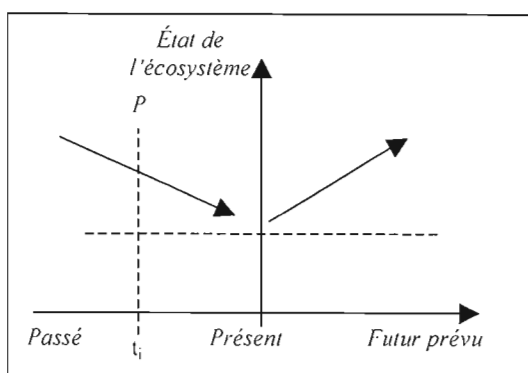
CAS N° 19



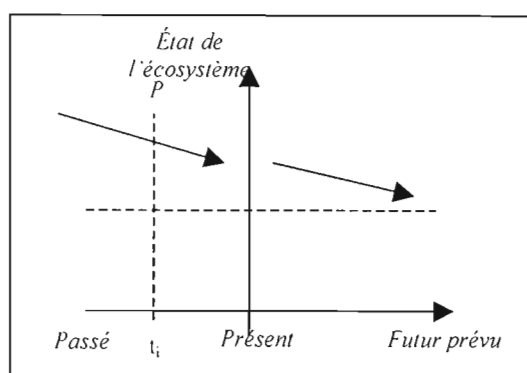
CAS N° 20



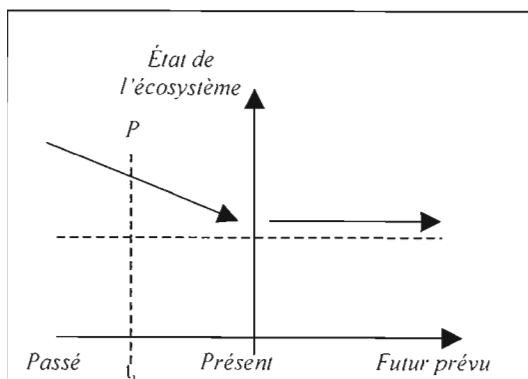
CAS N° 21



CAS N° 22



CAS N° 23



CAS N° 24

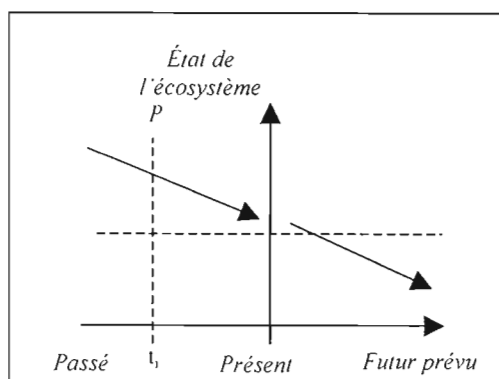


Figure 3-6: Situations d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation :
Cas N°s 19, 20, 21, 22, 23, et 24

3.1.3 Élaboration d'une typologie des solutions

Les solutions, relatives aux problèmes environnementaux, consistent généralement à intervenir directement ou indirectement sur l'écosystème. C'est pour cette raison que nous parlerons de typologie des interventions. Les interventions directes sont perçues comme une modification au sein même de l'écosystème (au niveau de sa nature, de sa structure ou de sa fonction) et les interventions indirectes sont celles qui consistent à modifier des variables d'entrée de l'écosystème. Par exemple, une intervention indirecte pourrait être l'arrêt des déversements d'huiles usagées dans les conduites d'eaux usées d'une entreprise. Une intervention directe pourrait être la modification génétique d'une plante pour qu'elle résiste à un herbicide.

Nous allons distinguer les interventions qui consistent à solutionner les problèmes du présent (vision déterministe) et les interventions qui consistent à solutionner les problèmes du futur (vision prospective), puisque comme nous l'avons vu, les méthodes sont différentes (voir section 2.2.4). Un problème présent nécessite une intervention urgente, et oblige à réagir du mieux possible à la situation non satisfaisante; alors qu'un problème prévu dans le futur laisse la possibilité de l'anticiper et même de faire en sorte qu'il n'existe pas.

Les types d'intervention seront élaborés en se basant sur l'observation de la réalité. L'objectif n'est donc pas de vérifier l'existence de ces interventions, mais plutôt d'explorer l'éventail de solutions plausibles.

Bien sûr, toutes ces interventions seront élaborées en jouant sur les différentes possibilités de diminution, suppression ou de conservation de la perturbation anthropique et sur les possibilités d'intervention directes ou indirectes sur l'écosystème.

3.1.4 Typologie des interventions

Nous avons recensé six interventions. Certaines sont davantage des procédés réactifs aux problèmes du présent. D'autres, de par leur nature, ont une connotation anticipative (problèmes du futur).

3.1.4.1 L'inaction totale

L'inaction totale – notion très explicite – consiste simplement à «laisser faire» l'évolution naturelle, c'est-à-dire à ne pas intervenir. Bien qu'il n'y ait aucune action à proprement parler, laisser le système s'ajuster à la perturbation demeure un choix d'intervention.

3.1.4.2 La relaxation

Comme son nom l'indique, cette intervention est indirecte et incite à relaxer le système. La relaxation est définie comme un phénomène spontané de relâchement et de retour progressif à l'état stable d'un système dont la stabilité a été rompue. En d'autres termes, elle consiste à arrêter définitivement l'action dont l'effet est la cause de la perturbation. Elle suggère en effet l'arrêt complet de la perturbation qui endommage l'écosystème. Cependant, elle peut être simplement à l'origine d'un «meilleur dosage» de la perturbation en fonction des capacités d'adaptation de l'écosystème (diminution de la cause pour un effet toléré par le système). Cette optimisation de la perturbation est à l'origine même de la création de normes comme, par exemple, les normes fixées par un gouvernement pour que les industries rejettent une quantité maximale d'un polluant donné. C'est ce que l'on appelle le processus d'autoépuration; où une quantité de polluant peut être épuré par l'écosystème lui-même.

3.1.4.3 La restauration

Le troisième type d'intervention est également indirecte et consiste à restaurer le système. Il s'agit d'abord, d'arrêter définitivement les causes de la dégradation du système (relaxation), puis d'aider l'évolution naturelle momentanément en introduisant de nouvelles perturbations. En effet, pour certains écosystèmes, l'arrêt de la perturbation n'est pas suffisante, car ceux-ci ne seront pas aptes à reprendre leur trajectoire vers un état souhaitable avec la simple suppression des causes ou, pour le moins, pas dans un délai acceptable. Les perturbations introduites consistent à modifier la nature ou la quantité des flux d'entrée

(énergie, informations, matières, données...) du système (intervention indirecte). La restauration se pratique dans des circonstances où le système montre une tendance à l'irréversibilité, c'est-à-dire l'impossibilité pour le système d'évoluer de nouveau vers une trajectoire souhaitable. On peut citer à titre d'exemple, l'ensemencement suite à l'arrêt de déversement de polluants dans un lac.

3.1.4.4 La régulation

La régulation nécessite d'identifier l'effet qui pourrait stimuler le système et par conséquent elle ne peut être appliquée qu'aux problèmes environnementaux présents. En effet, la régulation est une intervention indirecte qui consiste à intervenir de façon répétitive sur l'écosystème en modifiant la nature ou la quantité de ses flux d'entrée (énergie, informations, matières, données). Elle s'applique à des écosystèmes qui ne peuvent tendre vers la situation désirée d'eux-mêmes. La régulation est répétitive car les écosystèmes cherchent toujours à reprendre leur ancienne trajectoire. Il s'agit d'une situation où l'écosystème est dépendant d'une perturbation externe pour évoluer vers l'équilibre souhaité.

La régulation consiste donc à ne pas arrêter les causes des perturbations sur le système, mais à générer de nouvelles perturbations afin que le système ne s'affaiblisse pas et qu'il reste dans la trajectoire souhaitée. Cette nouvelle trajectoire n'est pas permanente et il faut régulièrement intervenir pour maintenir l'écosystème dans sa trajectoire. C'est l'exemple même des contrôles des populations par élimination (chasse) ou par introduction ou conservation des espèces.

Ces quatre interventions - inaction totale, relaxation, restauration et régulation - sont des interventions indirectes typiquement représentatives d'une réponse rapide à un problème urgent (problème survenant dans le présent). Il s'agit d'une attitude réactive.

À contrario, les deux interventions suivantes : la maîtrise et l'asservissement répondent à des problèmes du futur et se veulent une attitude prospective.

3.1.4.5 La maîtrise

La maîtrise consiste à modifier la nature ou la quantité de plusieurs flux d'entrée (énergie, informations, matière, données, etc.) simultanément en commençant par les causalités les plus évidentes jusqu'aux plus compliquées et moins apparentes.

La maîtrise est une intervention intégrée, c'est-à-dire qu'elle intègre tous les systèmes connexes (systèmes sociaux, économiques, politiques, etc.). De plus, la maîtrise est une intervention tenant compte des interrelations entre les différentes variables de ces mêmes systèmes.

Sa principale caractéristique est qu'elle est un ensemble d'interventions indirectes qui nécessitent un changement des systèmes connexes et donc des systèmes anthropiques. Elle est stimulante pour la technologie, mais représente un défi pour la gestion des organisations. Sa seconde caractéristique est qu'elle nécessite une intervention continue dans le temps (principe de Deming) pour implanter le futur désiré.

À priori, il est possible d'envisager que la maîtrise soit sans conséquences pour les écosystèmes. Cependant, des conséquences sont à craindre quant à la difficulté de mettre en place les changements des systèmes connexes et, notamment, quant à la pérennité du mode de développement actuel. Elle nécessite cependant du temps pour la planification et la mise en œuvre des modifications.

La maîtrise diffère de la régulation puisque d'une part, elle n'est pas répétitive, mais plutôt durable dans le temps, et d'autre part, elle s'adresse à des écosystèmes qui tendent ou ne tendent pas vers une trajectoire souhaitable, tandis que la régulation s'adresse uniquement à des écosystèmes qui ne tendent pas vers la trajectoire désirée. Enfin, la maîtrise agit sur un ensemble de causalité (c'est un ensemble d'interventions), tandis que la régulation cible une cause en particulier.

3.1.4.6 L'asservissement

Issu également d'une attitude prospectiviste, l'asservissement se distingue de la maîtrise sur trois points cruciaux.

Tout d'abord, cette intervention consiste à modifier directement la nature, la structure ou la fonction du système (intervention directe). Ainsi, le système réussit à s'adapter à la perturbation et lui devient résistant. En modifiant certains des aspects de l'écosystème, l'asservissement permet de changer sa trajectoire pour qu'il évolue vers un état souhaitable. Il s'agit en quelque sorte d'une reproduction du système lui-même si l'on peut faire l'analogie avec l'ordinateur. En effet, ses propriétés auto-organisatrices s'apparentent à un centre de décision. Le centre de décision changé, le système va évoluer vers le futur souhaité. Dans ce cas, il est possible de parler concrètement de la création d'un nouvel écosystème qui n'est plus un système naturel (s'il l'était au début), mais plutôt un système hybride (mi-naturel, mi-artificiel). On peut, à ce titre reprendre l'exemple de la modification génétique d'une plante pour la rendre plus résistante à son environnement.

Le second point, relatif à la différence entre la maîtrise et l'asservissement, est que celui-ci adapte les écosystèmes aux systèmes connexes (socio-économiques), alors que la maîtrise prétend adapter les systèmes connexes aux écosystèmes et laisser les écosystèmes évoluer dans leurs marges naturelles.

Le troisième point mesure les différences en termes de conséquences. En effet, le degré d'incertitude quant à l'équilibre de l'écosystème et même de l'écosystème planétaire est très élevé. Car même si sa nature, sa fonction ou sa structure ont été modifiées, celui-ci va continuer à s'auto-organiser, échanger de nouvelles informations avec son environnement et, finalement, de nouvelles propriétés vont émerger : l'écosystème va se complexifier. Ces propriétés émergentes vont peut-être, à leur tour, constituer un écosystème dont l'état ne sera pas satisfaisant et, qui plus est, modifier l'environnement (les systèmes connexes). Une telle intervention change la trajectoire de l'écosystème de manière irréversible. C'est tout l'équilibre des systèmes connexes qui va être modifié.

Tous les écosystèmes peuvent être l'objet de ce type d'intervention mais l'asservissement nécessite du temps et une forte innovation technologique, voire biotechnologique.

La maîtrise et l'asservissement s'appliquent à des problèmes environnementaux dont le niveau de complexité est élevé. Toutefois, leur recours peut s'effectuer à différents niveaux d'organisation et à différentes échelles spatiales de l'écosystème.

Maintenant que les deux typologies sont élaborées, il faut établir la méthodologie qui permettra de mettre en relation ces deux dernières.

3.1.4.7 Méthodologie pour la mise en relation des deux typologies

Il s'agit ici de mettre en relation deux variables qualitatives : la typologie des problèmes environnementaux et la typologie des interventions. Nous allons tenter de construire une explication logique pour relier ces deux variables, afin d'élaborer un outil facilitant la résolution des problèmes environnementaux. Celle-ci est basée sur l'étude de la relation entre l'évolution de l'état de l'écosystème suite à une perturbation et le type de solution adéquat.

Nous tenterons à travers cette explication, de mettre en avant les récurrences et les constantes qui apparaissent. Deux méthodes peuvent permettre la confrontation de ces deux variables qualitatives.

La première consiste à induire, en fonction des types d'intervention, le type de problème environnemental auquel celui-ci s'applique.

La seconde est de partir d'un cas de problème environnemental, de l'analyser et d'en déduire le ou les type(s) d'intervention(s) recommandé(s).

Le raisonnement est inversé, mais l'une ou l'autre méthode permet de retrouver les mêmes types de cas pour une intervention. Toutefois, nous analyserons les vingt-quatre modèles et en déduirons les interventions, comme dans le cas d'une résolution concrète de problème environnemental. Il s'agit d'essayer de rester le plus objectif possible quant aux choix de propositions d'intervention appliquées aux cas de problèmes environnementaux. Toutefois, nous insisterons et recommanderons les interventions qui favorisent l'évolution naturelle de l'écosystème vers une trajectoire normale.

Cette analyse s'exécutera selon les étapes suivantes :

- Description de la tendance générale du modèle.
- Proposition des hypothèses relatives à la tendance d'évolution suivie par l'écosystème d'une part et à ses aspects fonctionnels d'autre part.
- Détermination des interventions possibles et recommandations des interventions.

À l'issue de cette explication, nous présenterons les résultats dans un tableau de synthèse, permettant la facilité de leur lecture, mais surtout pour finaliser notre outil en réalisant une grille de synthèse. En effet, pour utiliser un tel outil, il faut qu'il soit facile d'utilisation. Lorsque l'on voudra l'utiliser, c'est parce qu'on aura recueilli auparavant des données sur l'écosystème (données du passé et du présent). À partir de la tendance d'évolution de l'écosystème, il sera possible rapidement d'identifier la solution adéquate.

Nous créerons un tableau à double entrée représentant toutes les tendances possibles d'évolution de l'écosystème pour la période passé/présent (première entrée) et pour la période présent/futur (seconde entrée). À la lecture, dans la grille, des deux périodes d'évolution de l'écosystème étudié, on pourra connaître la solution à privilégier. Toutefois, il est possible qu'il existe plusieurs solutions en fonction des hypothèses qui seront émises. On retrouvera alors également ces hypothèses nous informant du type d'écosystème et la solution qui lui correspond.

C'est à l'issue de cette typologie des interventions et des problèmes environnementaux que nous allons désormais tenter de construire l'explication permettant peut-être l'élaboration d'une grille de référence pour la résolution de problèmes environnementaux. En effet, toutes les conditions et postulats nécessaires à la confrontation des deux variables sont maintenant réunis. Nous sommes en mesure de nous demander s'il sera possible de mettre en avant des récurrences, indispensables à l'élaboration de la grille de référence. C'est l'objectif que nous maintiendrons et auquel nous assignerons les résultats présentés dans le chapitre 4.

CHAPITRE 4

VERS LA GÉNÉRALISATION DU TRAITEMENT DES PROBLÈMES ENVIRONNEMENTAUX

Ce chapitre constitue le cœur de cette recherche et va déterminer s'il est possible d'élaborer une grille de synthèse permettant d'accélérer et d'améliorer le processus de résolutions de problèmes environnementaux. Il se divise en deux parties : la première section est vouée à l'analyse et la résolution des cas de problèmes environnementaux présentés au chapitre précédent, tandis que la seconde est d'en synthétiser les résultats.

4.1 Analyse des données

Cette première partie consiste à confronter les deux typologies, en cherchant à mettre en relation le modèle de l'évolution de l'état de l'écosystème soumis à une perturbation anthropique et un type de solution adéquat. (Cas N°1 page suivante)

CAS N° 1

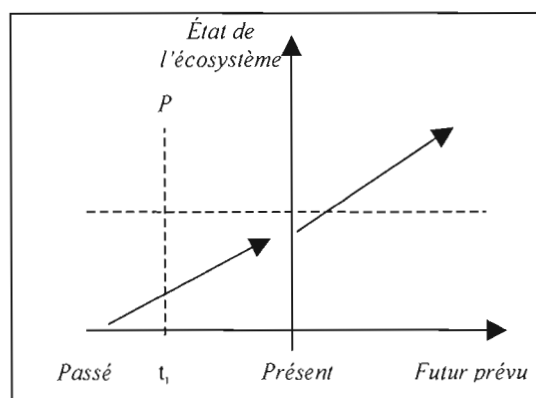


Figure 4- 1 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N° 1

Pour ce cas No 1, la tendance de l'évolution de l'état de l'écosystème montre une augmentation constante vers un état souhaitable. Par le passé, il s'est trouvé dans une situation non souhaitée. La situation présente est encore sous le seuil d'acceptabilité; cependant, la prévision future projette un retour à l'équilibre normal de l'écosystème.

Nous remarquons dans ce cas-ci, qu'en dépit de la perturbation, l'écosystème tend vers une situation souhaitable.

On pourrait penser que la perturbation stimule le système. En effet, par le passé, l'écosystème se trouvait dans un état pathologique et l'introduction de la perturbation a pu entraîner un changement positif de l'état de l'écosystème en développant de nouvelles propriétés auto-organisatrices. Celles-ci ont permis l'évolution vers une trajectoire satisfaisante. Cette hypothèse suggère que l'écosystème est dépendant de son environnement pour développer de nouvelles propriétés auto-organisatrices. Il s'agit d'un écosystème qui tend vers une trajectoire artificielle : sans cette perturbation, l'écosystème serait sans doute resté dans un état pathologique.

Toutefois, on peut aussi émettre une seconde hypothèse : l'écosystème a pu évoluer vers une nouvelle trajectoire (équilibre souhaité). Il est donc insensible à la perturbation de par ses grandes propriétés auto-organisatrices. L'écosystème, dans ce cas, tend vers une trajectoire naturelle.

Nous recommandons, quelque soit les possibilités, une inaction totale puisque la perturbation n'endommage pas le système, mais il n'en demeure pas moins que celui-ci doit faire l'objet d'une étroite surveillance, surtout en ce qui concerne les risques à long terme. Nous pourrions aussi recommander une restauration dans le cas de la première possibilité, car l'écosystème se trouvait dans une situation pathologique dans le passé et sans la perturbation, il serait peut-être resté dans cet état.

CAS N° 2

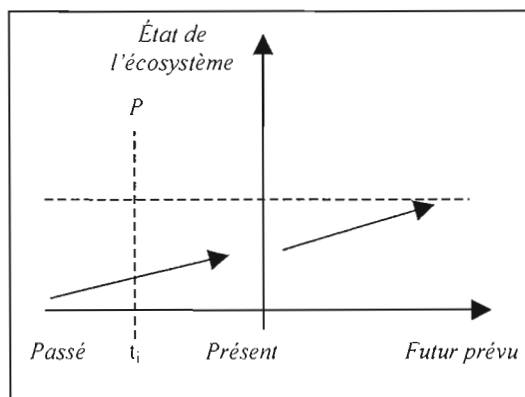


Figure 4- 2 :Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N° 2

Concernant le cas N° 2, la tendance générale de l'évolution de l'état de l'écosystème montre une évolution vers le seuil d'acceptabilité sans pour autant l'atteindre. Les situations présentes et futures sont non satisfaisantes, même s'il est possible d'observer que l'état de l'écosystème s'améliore. Deux possibilités sont envisageables :

L'écosystème est stimulé par la perturbation, ce qui explique la tendance vers le seuil d'acceptabilité du système. Mais, la perturbation n'est pas assez "efficace" pour permettre à l'écosystème d'atteindre un état normal. Dans ce cas, il s'agit d'un système qui est dépendant de son environnement pour tendre vers la trajectoire souhaitée.

Il est aussi possible que l'écosystème évolue indépendamment de la perturbation et qu'il ait développé des propriétés auto-organisatrices. Cependant, sa course est ralentie par l'effet de la perturbation (ou de l'ensemble de perturbations).

Nous recommanderons, selon la première possibilité, une régulation parce que l'écosystème ne tend pas de lui-même vers la situation désirée. Cependant, il est possible que cette intervention puisse entraîner des conséquences non désirées sur le long terme, avec des risques d'affaiblissement plus prononcés de l'écosystème. Puisque ce dernier se trouvait déjà par le passé dans une situation non satisfaisante, nous recommanderons une restauration pour qu'il retrouve une situation satisfaisante et qu'il tende de lui-même vers une trajectoire souhaitable.

Dans la seconde possibilité, si l'écosystème s'est déjà auto-organisé pour tendre vers une situation satisfaisante, mais qu'il est ralenti par la perturbation, nous recommanderons une

relaxation et plus précisément l'arrêt complet de la perturbation. Toutefois, cette situation permet aussi une régulation. Celle-ci permettrait de ne pas arrêter la perturbation, mais l'introduction d'une nouvelle perturbation pour forcer l'écosystème à tendre vers une trajectoire satisfaisante pourrait affaiblir l'écosystème sur le long terme.

CAS N° 3

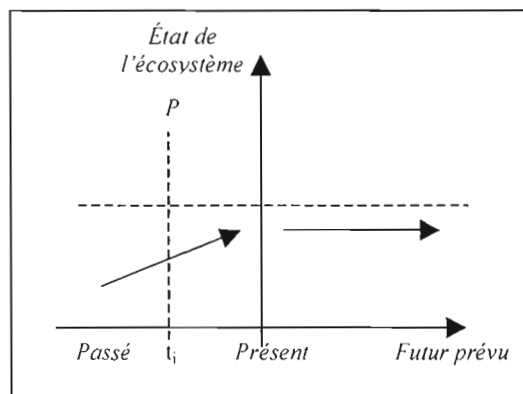


Figure 4- 3 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N° 3

Pour ce troisième cas, le modèle représente un écosystème dont la tendance générale montre que l'évolution de son état croît vers un état satisfaisant, mais demeure en dessous du seuil d'acceptabilité. Deux phases peuvent être distinguées :

La première (passé-présent) montre que l'écosystème passe d'un état pathologique à un état en dessous du seuil d'acceptabilité. La seconde phase (présent-futur) montre que l'écosystème se stabilise dans une situation non satisfaisante en dessous du seuil d'acceptabilité. Les situations passée, présente et future ne sont pas satisfaisantes. Nous pouvons émettre quelques possibilités concernant ce type de cas :

Il est possible d'envisager que la perturbation stimule l'écosystème alors que celui-ci était dans un état non satisfaisant. L'écosystème reprend donc une trajectoire vers un état souhaité mais, arrivé à un certain stade de son développement, soit la perturbation n'a plus d'effet (l'écosystème ne réagit plus), soit des conséquences indirectes de la perturbation se font sentir.

Le système a tenté, par le passé, de retrouver un équilibre normal en développant de nouvelles propriétés auto-organisatrices. Toutefois, l'introduction de la perturbation dans le passé a fait que le système s'est fragilisé et a fini par lutter (boucles rétroactives négatives). Il parviendra à lutter contre la perturbation selon le futur prévu, mais pas suffisamment pour continuer sa trajectoire vers un équilibre normal. D'autre part, on peut penser qu'il réagit tardivement à la perturbation car il a une forte inertie.

Selon la première situation, nous recommanderons une restauration pour permettre au système de tendre naturellement vers sa trajectoire car il se trouvait déjà dans un état pathologique, et sans la perturbation, nous pourrions envisager qu'il soit resté dans cet état.

Dans le second cas, nous recommanderons une relaxation puisque l'écosystème a les capacités à tendre de lui-même vers une trajectoire souhaitable. Enfin, quelles que soient les possibilités, la régulation reste une intervention qui permettrait de faire tendre artificiellement l'écosystème vers une trajectoire souhaitable. Toutefois, les conséquences d'une régulation sont à envisager.

CAS N° 4

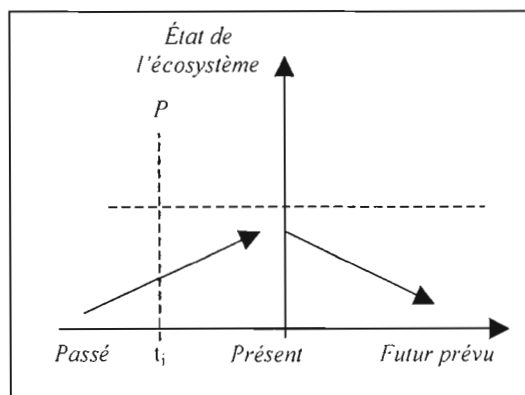


Figure 4- 4 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N° 4

La tendance générale de l'évolution de l'état de l'écosystème montre que celui-ci est instable, passant d'un état non souhaité à un état proche du seuil d'acceptabilité dans le passé/présent, pour finalement tendre vers un état non souhaité comme l'indiquent les prévisions (présent/futur souhaité). Deux possibilités peuvent alimenter ce type de cas.

Tout d'abord, le premier moment peut révéler que l'écosystème est stimulé par la perturbation : on pourrait penser qu'il est dépendant de son environnement. Le fait que le second moment montre une tendance d'évolution vers un état pathologique pourrait s'expliquer par la présence d'effets secondaires, apparus plus tardivement. On peut, par exemple penser à un écosystème agricole où la quantité d'engrais est supérieure aux capacités du système.

Ensuite, le premier moment peut révéler que l'écosystème est insensible à la perturbation et qu'il tend de lui-même vers une situation acceptable. Il a donc développé des propriétés auto-organisatrices. Le fait qu'il tende vers une trajectoire pathologique dans le second moment peut s'expliquer par sa forte inertie, car il réagit tardivement à la perturbation.

Bien que l'on puisse envisager la régulation dans les deux cas, on recommandera, selon la première possibilité, une restauration, car l'écosystème était déjà affaibli par le passé et la perturbation va accentuer son état pathologique. Selon la seconde possibilité, nous recommanderons une relaxation puisque l'écosystème tend de lui-même vers une trajectoire normale.

CAS N° 5

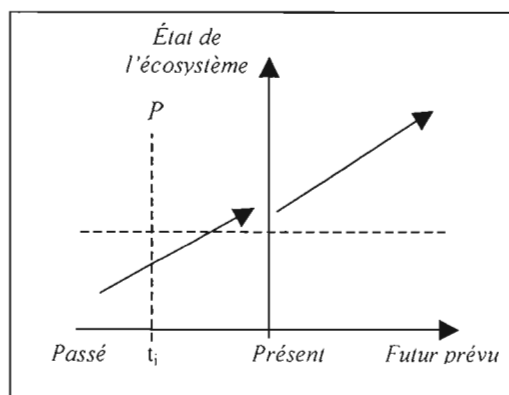


Figure 4- 5 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N° 5

Le cas N° 5 montre que l'évolution générale de l'état de l'écosystème tend vers un état souhaitable. L'état de l'écosystème dans le passé représentait un état non souhaité, cependant, les situations présentes et futures ne représentent pas un problème environnemental. Ce type de cas ne représente pas un problème environnemental.

CAS N° 6

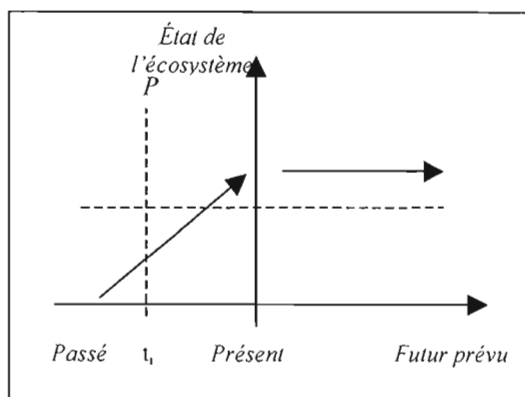


Figure 4- 6 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N° 6

Le modèle représente un écosystème dont l'évolution de l'état passe d'un état non satisfaisant à un état satisfaisant, comme le montre la première période (passé/présent). On remarque, cependant, que l'écosystème affiche une certaine stabilité dans un état satisfaisant selon les prévisions (présent/futur). Néanmoins, ce type de cas ne représente plus un problème environnemental puisque les situations présente et future sont satisfaisantes.

CAS N° 7

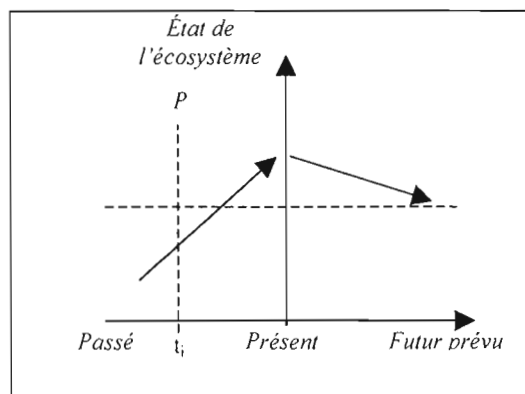


Figure 4- 7 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N° 7

La tendance générale montre que l'état de l'écosystème passe d'une situation non satisfaisante à une situation satisfaisante dans la zone passé/présent, mais son état se dégrade légèrement vers le seuil d'acceptabilité sans pour autant l'atteindre.

La première possibilité montre que la perturbation a stimulé l'écosystème, mais des effets sur le long terme pourraient se faire sentir selon les prévisions, puisque l'écosystème se dégrade.

La seconde possibilité est que l'écosystème tend de lui-même vers la situation désirée et ne semble pas tenir compte de la perturbation dans la période passé/présent. Mais, dans la seconde période, l'état de l'écosystème se dégrade légèrement puisqu'il tend vers le seuil d'acceptabilité sans pour autant l'atteindre.

Ce type de cas ne représente pas un problème environnemental, cependant, la situation doit être étroitement surveillée. En effet, il est envisageable, qu'avec le temps, l'état de l'écosystème va continuer de se dégrader.

CAS N° 8

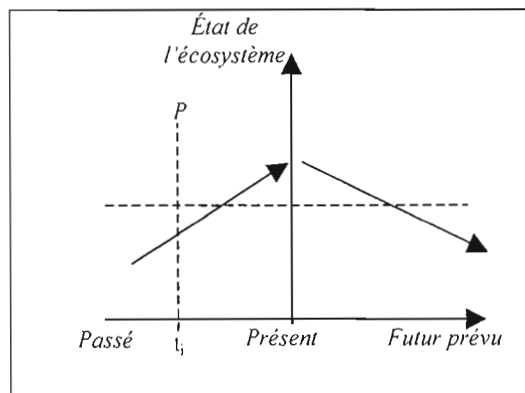


Figure 4- 8 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N° 8

Le cas N° 8 indique que la situation présente est satisfaisante mais que l'état de l'écosystème dans le futur serait amené à évoluer vers une situation non satisfaisante. De plus, dans le passé, l'écosystème se trouvait déjà dans une situation pathologique. Deux possibilités sont alors envisageables :

L'écosystème a pu être stimulé par la perturbation, mais des effets secondaires se font sentir sur le moyen et long terme, d'où la dégradation prévue de son état.

L'écosystème ayant de fortes propriétés auto-organisatrices, il évolue de lui-même vers une situation normale. Cependant, sa forte inertie fait qu'il manifeste tardivement les effets néfastes de la perturbation.

Pour traiter un problème environnemental futur, nous recommanderons, dans les deux situations présentées, la maîtrise (bien que l'asservissement soit envisageable). Celle-ci va permettre de modifier l'ensemble des flux d'entrée de l'écosystème pour qu'il poursuive une trajectoire vers un état normal. La maîtrise permet de privilégier l'évolution naturelle de l'écosystème.

CAS N° 9

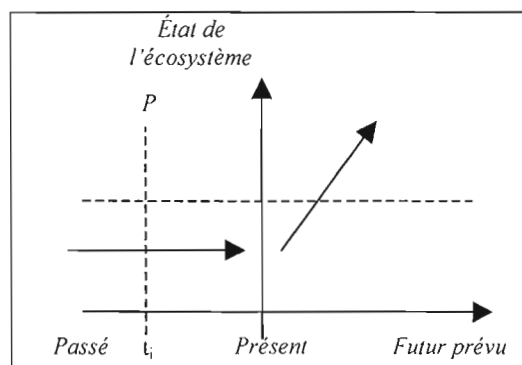


Figure 4- 9 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N° 9

La tendance générale de l'évolution de l'état de l'écosystème montre que celui-ci passe d'un état pathologique à un état normal. La première période (passé/présent) indique que l'écosystème se trouve dans un état pathologique stable ; tandis que la seconde période (présent/futur prévu) montre qu'il tend vers un état normal. Les situations passée et présente ne sont pas satisfaisantes, mais les prévisions de l'évolution de l'état de l'écosystème dans le futur montrent que la situation devient satisfaisante.

Par le passé, l'écosystème se trouve déjà dans une situation non satisfaisante, mais ne semble pas réagir à la perturbation. Cependant, il se peut que l'écosystème réagisse avec une forte inertie et réponde tardivement à la perturbation. Celle-ci a un effet stimulateur et a permis à l'écosystème de tendre vers une trajectoire satisfaisante.

L'écosystème est donc dépendant de son environnement et ne peut évoluer tout seul vers une trajectoire normale.

Nous recommanderons une inaction totale avec une surveillance étroite des possibles effets indésirables. L'écosystème tend donc vers une trajectoire artificielle, mais celle-ci est en accord avec le désir d'une situation normale.

CAS N° 10

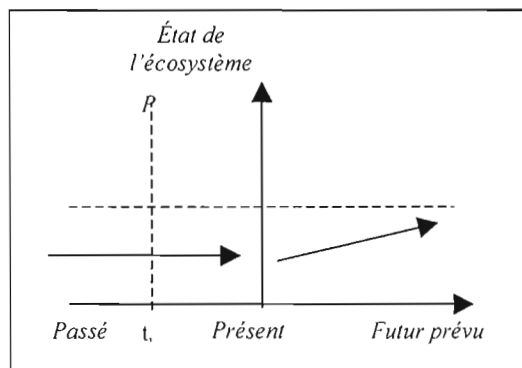


Figure 4- 10 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N° 10

Le cas No 10, présente un type d'écosystème dont l'état se trouve dans une situation non satisfaisante dans le présent comme dans le futur.

Il est possible que l'écosystème réagisse "positivement" à la perturbation, mais avec une forte inertie ; ce qui expliquerait qu'il tende vers le seuil d'acceptabilité sans toutefois l'atteindre. L'écosystème est donc dépendant de son environnement pour évoluer vers une trajectoire souhaitable.

En conséquence, nous recommanderons une restauration pour permettre à l'écosystème de tendre de lui-même vers une trajectoire souhaitable; de plus depuis le passé, il se trouve dans une situation insatisfaisante. La régulation est aussi envisageable bien qu'elle puisse affaiblir encore plus l'écosystème sur le moyen et long terme. La relaxation s'avère insuffisante, puisque l'écosystème ne tend pas de lui-même vers la trajectoire souhaitée.

CAS N° 11

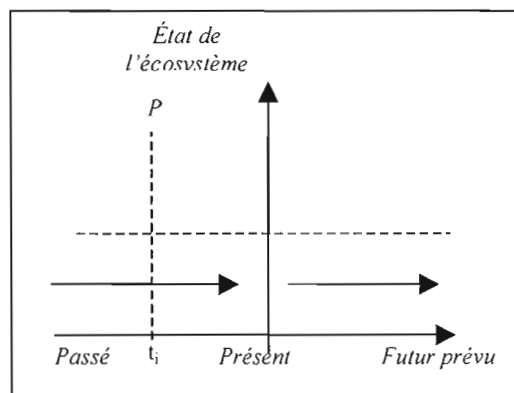


Figure 4- 11 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N° 11

L'écosystème évolue dans une situation pathologique de façon continue et semble n'avoir aucune réaction à la perturbation.

Il est possible qu'il ait déjà beaucoup perdu de sa variété et qu'il ne puisse répondre à cette perturbation.

Nous recommanderons dans ce cas, une restauration. Toutefois, la particularité de l'état de l'écosystème pourrait ne laisser d'autre choix que de le réguler en dépit des conséquences possibles à long terme, puisqu'il semble se maintenir dans un état stable non souhaité.

CAS N° 12

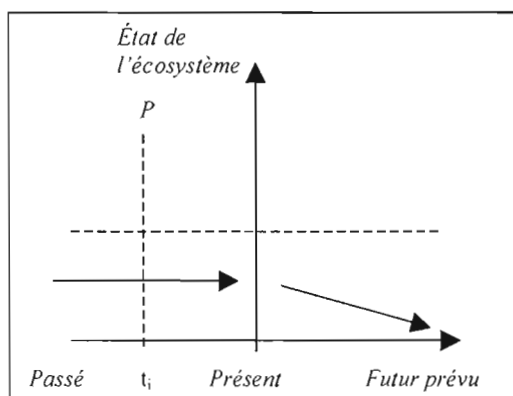


Figure 4- 12 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N° 12

Le cas No 12 montre qu'il s'agit d'un type d'écosystème qui se trouvait déjà dans une situation non satisfaisante par le passé. Toutefois, les prévisions futures montrent que l'écosystème sera amené à s'affaiblir encore plus pouvant entraîner un état d'irréversibilité.

D'après le futur prévu, l'écosystème sera amené à réagir avec une forte inertie à la perturbation. De plus, celle-ci aura un impact irréversible si aucune intervention ne se fait dans la situation présente.

Nous recommanderons donc pour ce type de cas une restauration ; et plus particulièrement, l'arrêt complet de la perturbation suivi de l'introduction de nouvelles perturbations pour enlever toutes traces de perturbations antérieures. Cela va permettre à l'écosystème de tendre de lui-même vers une trajectoire normale. Il est quand même possible, bien que nous ne la recommanderons pas ici, d'agir par une régulation. Toutefois, il doit être envisagé la possibilité de conséquences sur le long terme suite à cette intervention (risque de saturation).

CAS N° 13

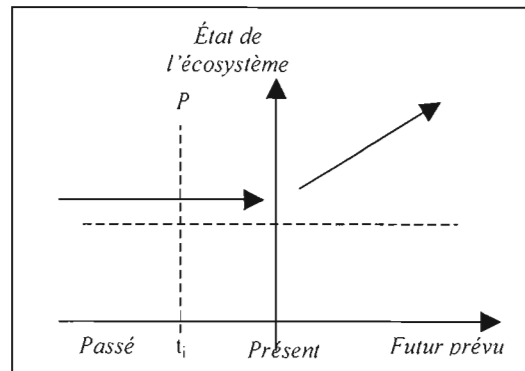


Figure 4- 13 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N° 13

Le cas No 13 montre que l'écosystème se trouve dans une situation présente satisfaisante. Les prévisions montrent que son état tend vers une trajectoire de climax. Bien qu'il soit possible que la perturbation ait stimulé l'écosystème, les situations présente et future ne représentent pas un problème environnemental.

CAS N° 14

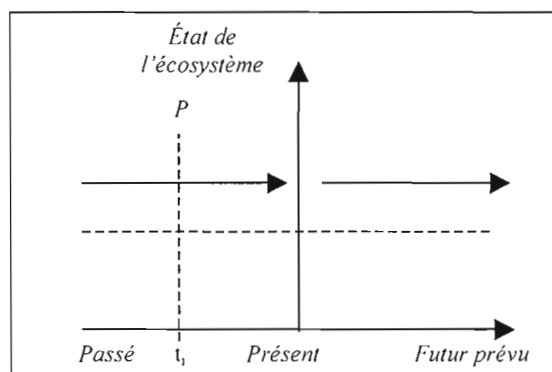


Figure 4- 14 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N° 14

La tendance générale de l'évolution de l'écosystème est stable dans une situation satisfaisante. La perturbation ne semble pas affecter l'écosystème qui demeure dans le même état. Il s'agit d'un écosystème très résilient qui intègre la perturbation et s'adapte à elle continuellement sans que cela l'affecte dans la poursuite de sa trajectoire dans un état normal.

Ce type de cas ne représente pas un problème environnemental.

CAS N° 15

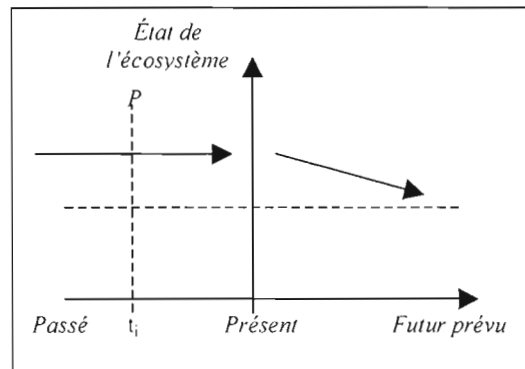


Figure 4- 15 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N° 15

Le cas N° 15 montre que l'état de l'écosystème est stable et satisfaisant. Néanmoins, les prévisions futures indiquent que son état pourrait se dégrader, sa tendance évoluant vers le seuil d'acceptabilité sans toutefois l'atteindre. L'écosystème pourrait être sensible à la perturbation et réagit avec une forte inertie. Bien que les situations présente et future sont satisfaisantes et qu'elles ne représentent pas un problème environnemental, nous recommanderons une surveillance étroite de l'écosystème afin que celui-ci ne soit pas amené à évoluer vers un état non satisfaisant.

CAS N°16

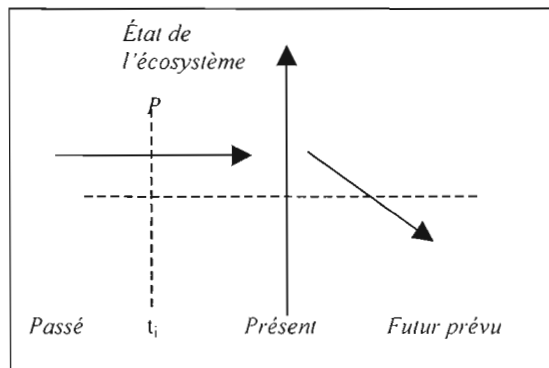


Figure 4- 16 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N°16

La tendance générale de l'évolution de l'état de l'écosystème montre que celui-ci passe d'une situation satisfaisante à une situation non satisfaisante d'après les données prévisionnelles.

L'écosystème réagit à la perturbation en changeant de trajectoire mais tardivement : il a une forte inertie et il est sensible à la perturbation.

Étant un problème futur, ce type de cas présente l'avantage de bien pouvoir préparer l'intervention. Il laisse en effet le temps de penser à des solutions plus intégrées comme la maîtrise.

Si la perturbation ne peut être arrêtée, alors il faudrait modifier la nature, la structure ou la fonction de l'écosystème afin qu'il ne se laisse pas affaiblir. C'est l'asservissement.

Également, il est possible de transformer la perturbation d'origine pour que celle-ci n'ait pas d'impacts négatifs sur l'écosystème : c'est la maîtrise.

Dans le cas d'un asservissement, les nouvelles propriétés du système hybride seront transmises sous forme d'information à l'environnement de l'écosystème, lequel devra alors s'adapter en développant à son tour de nouvelles propriétés susceptibles d'augmenter l'incertitude quant aux conséquences à long terme. Pour ces raisons, nous ne recommanderons pas cette intervention.

La maîtrise s'avère être l'intervention qui privilégie le plus l'écosystème et c'est celle-ci que nous recommanderons. Si l'écosystème évoluait dans un état souhaitable dans le passé, il est important qu'il soit conservé dans cet état. Ce cas est l'exemple typique de nombreux sujets de préoccupation tels que les changements climatiques dus aux effets de serre.

CAS N° 17

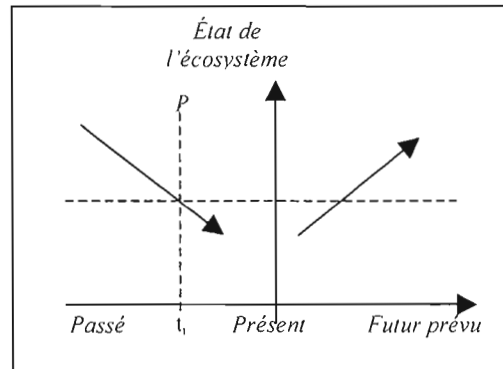


Figure 4- 17 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N°17

Le cas N°17 présente l'évolution de l'état d'un écosystème qui passe d'une situation satisfaisante dans le passé à un état non satisfaisant dans le présent, pour revenir à un état normal d'après les prévisions futures.

L'écosystème réagit aussitôt à la perturbation durant la première période (passé/présent). Il est fragile et semble sensible à la perturbation. Toutefois, durant la seconde période (présent/futur), il réagit une nouvelle fois en reprenant sa trajectoire initiale vers un état normal. Nous pourrions supposer qu'il a développé des propriétés auto-organisatrices pour s'adapter à la perturbation.

L'écosystème reprenant de lui-même sa trajectoire vers un état normal, et de ce fait, intégrant les effets de la perturbation, l'inaction totale semble l'intervention la plus judicieuse en surveillant de possibles effets secondaires. Pour minimiser ce risque, une relaxation aurait pu être faite, et comme cela, l'écosystème aurait retrouvé sa trajectoire initiale sans la nécessité d'une surveillance étroite.

CAS N° 18

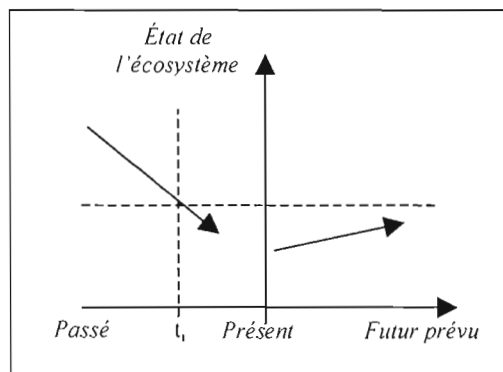


Figure 4- 18 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N° 18

Le cas N°18 montre que l'écosystème se trouvait dans un état souhaitable par le passé, mais qu'il a changé de trajectoire pour un état pathologique. La situation présente est donc non satisfaisante. Toutefois, les prévisions futures montrent que l'écosystème inverse sa tendance puisqu'il tend vers le seuil d'acceptabilité, mais ne l'atteint pas.

Il est possible que dans un premier temps, l'écosystème réagisse fortement à la perturbation et qu'il ait peu de propriétés homéostatiques pour maintenir sa trajectoire dans un équilibre souhaitable. Toutefois, il semble, d'après les prévisions futures qu'il ait développé des propriétés auto-organisatrices pour répondre à cette perturbation et reprendre sa trajectoire, mais pas suffisamment.

Dans ce cas, nous recommanderons une relaxation puisque l'écosystème peut tendre de lui-même vers une situation satisfaisante. Il est possible aussi de le réguler bien que la régulation puisse engendrer des conséquences sur le moyen et long terme.

CAS N° 19

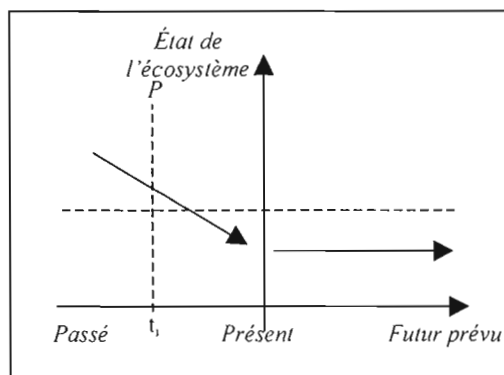


Figure 4- 19 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N° 19

L'évolution générale de l'état de l'écosystème tend vers une situation non satisfaisante.

Le premier moment montre que l'écosystème réagit à la perturbation, passant d'une situation normale à une situation pathologique. La situation présente est non satisfaisante. Le second moment indique que l'écosystème se maintient dans un état stable pathologique.

L'écosystème est sensible à la perturbation et s'est affaibli par la passé. Puis, il semble y avoir un équilibre entre les effets de la perturbation et les propriétés homéostasiques restantes, ce qui laisse supposer, qu'en arrêtant la perturbation, l'écosystème va reprendre une trajectoire vers un état normal. Pour ce type de cas, la relaxation semble l'intervention la plus appropriée. Mais la régulation serait le moyen de contraindre l'écosystème à tolérer la perturbation s'il n'est pas possible de l'arrêter. Cependant, cela risque de nuire au système sur le long terme comme nous l'avons déjà évoqué.

Nous recommanderons la relaxation pour ses effets durables.

CAS N° 20

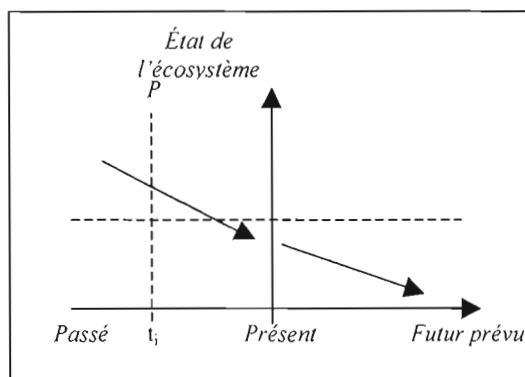


Figure 4- 20 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N°20

Le cas No 20 montre que l'état de l'écosystème se dégrade de manière continue. La situation présente est non satisfaisante alors que l'écosystème se trouvait dans une situation acceptable par le passé. La situation future est également non satisfaisante puisque l'écosystème poursuit sa trajectoire vers un état non satisfaisant. On pourrait penser que l'écosystème tend vers une situation d'irréversibilité.

Il s'agit d'un écosystème qui a de faibles propriétés homéostatiques. Nous recommanderons pour ce cas une relaxation avec arrêt complet de la perturbation. De cette manière, l'écosystème pourra tendre à nouveau vers une trajectoire normale. Pour des résultats plus rapides, il est possible d'envisager une restauration (faible incertitude liée aux risques de dégradation de l'écosystème sur le long terme) ou une régulation (forte incertitude liée aux risques de dégradation de l'écosystème sur le long terme).

CAS N° 21

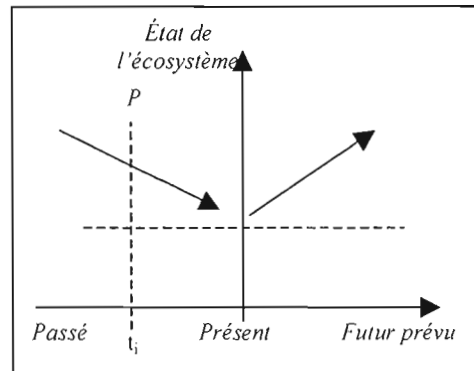


Figure 4- 21 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N° 21

Dans le premier moment, l'écosystème réagit à la perturbation en montrant des signes d'affaiblissement. Cependant, la prévision du système montre que celui-ci reprend sa trajectoire initiale vers une situation de climax. Le système a de fortes propriétés auto-organisatrices et une forte résilience avec inertie. Ce type de cas ne représente pas un problème environnemental (situations présente et future acceptables).

CAS N° 22

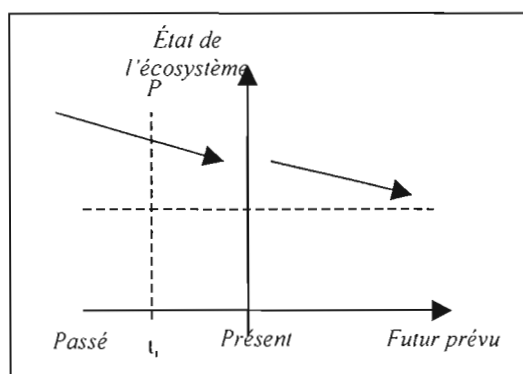


Figure 4- 22 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N° 22

L'écosystème évolue dans un état normal. Néanmoins, il s'est affaibli suite à la perturbation durant le passé/présent. Les prévisions montrent que son état continue lentement de se dégrader.

Ce cas ne représente pas un problème environnemental, mais nous recommanderons une surveillance de l'écosystème.

CAS N° 23

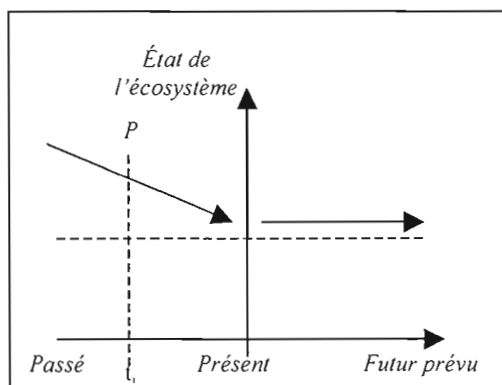


Figure 4- 23 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N° 23

Le cas No 23 montre que l'état de l'écosystème passe d'une situation souhaitable à une situation acceptable. En effet, par le passé, l'écosystème se trouvait dans une situation souhaitable, mais, les conséquences de la perturbation ont entraîné une dégradation de son état qui tend vers le seuil d'acceptabilité. Toutefois, le futur prévu montre que l'état de l'écosystème semble se stabiliser au-dessus du seuil. L'écosystème a peut-être atteint un équilibre relatif entre l'effet nuisible de la perturbation et ses propriétés homéostasiques.

Quoi qu'il en soit, les situations présente et future ne représentent pas un problème environnemental.

CAS N° 24

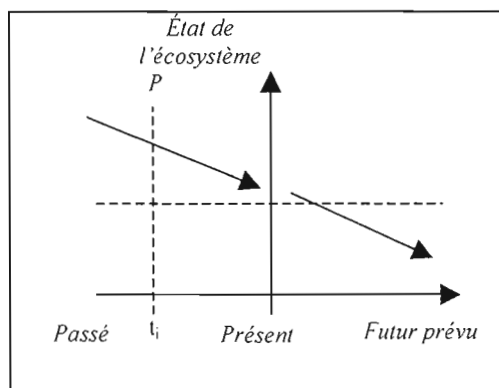


Figure 4- 24 : Modèle d'évolution de l'état d'un écosystème soumis à une perturbation : Cas N° 24

Pour le dernier cas, le modèle montre que l'état de l'écosystème se dégrade lentement passant d'une situation normale à une situation pathologique selon les prévisions. La situation présente ne représente pas de problème environnemental, tandis que le futur prévu montre que l'état de l'écosystème peut représenter un problème. Parmi les deux possibilités relatives à la résolution de problèmes futurs, nous recommanderons une maîtrise afin que l'écosystème retrouve sa trajectoire normale.

Il est possible de pratiquer l'asservissement, toutefois, ce dernier nécessite de modifier la nature même de l'écosystème ou sa fonction, ce qui forcerait l'environnement de l'écosystème à devoir s'adapter aux nouvelles informations que l'écosystème va générer. Cette adaptation risque de représenter sur le moyen et long terme une situation non désirée.

L'analyse des vingt-quatre cas étant faite, nous avons pu nous rendre compte de la possibilité d'établir des liens entre l'évolution de l'état de l'écosystème et un type de solution, sans que ces liens se répètent systématiquement. Il existe des cas particuliers et il est possible de représenter ces résultats dans un tableau de synthèse.

4.2 Un outil pour faciliter la prise de décision : la grille de synthèse

Le tableau 4.1 (voir page suivante) synthétise l'analyse des cas de problèmes environnementaux. Il permet d'identifier les cas étudiés en fonction de l'évolution de l'état de l'écosystème dans le passé/présent et dans le présent/futur.

Le tableau 4.2 (voir p.88) montre les interventions recommandées en fonction des types de problème environnemental et en fonction de certaines caractéristiques de l'écosystème. Ce tableau constitue une grille de référence permettant de faciliter la prise de décision pour résoudre un problème environnemental.

Présent/futur Passé/ présent	Patho/ stable	Patho/ patho	Patho/ seuil-	Patho/ normal	Normal/ stable	Normal/ seuil+	Normal/ patho	Seuil - /normal	Seuil- /seuil -	Seuil -/ patho	Seuil+/ normal	Seuil+/ patho	Seuil+/ stable
Patho/ stable	Cas 11	Cas 12	Cas 10	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Patho/ patho	X	X	Cas 2	Cas 9	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Patho/ normal	X	X	X	X	Cas 6	Cas 7	Cas 8	X	X	X	X	X	X
Patho/ seuil -	X	X	X	X	X	X	X	Cas 1	Cas 3	Cas 4	X	X	X
Patho/ Seuil +	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Cas 5	X	X
Seuil +/ stable	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Cas 13	X	X
Normal/ Stable	X	X	X	X	Cas 14	Cas 15	Cas 16	X	X	X	X	X	X
Normal/ Normal	X	X	X	X	X	Cas 22	X	X	X	X	X	X	X
Normal/ seuil +	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Cas 21	Cas 24	Cas 23
Normal/ seuil-	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Cas 20	X	X	X
Normal/ patho	Cas 19	X	Cas 18	Cas 17	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Tableau 4- 1 Synthèse des tendances d'évolution possibles de l'état de différents types d'écosystèmes suite à une perturbation continue et constante

Légende :



Situations présente et future pathologiques



Situations présente pathologique et future normale



Situations présente normale et future pathologique



Situations présente et future normale

X

Situations impossibles ou non représentées

État de l'écosystème Fonctions de l'écosystème	Situations présente et future pathologiques	Situations présente pathologique et future normale	Situations présente normale et future pathologique	Situations présente et future normale
FC-fi-fr	Régulation/Relaxation (18, 19)			Surveillance étroite (22)
FC-FI-fr	Régulation, relaxation (3, 4)		Maîtrise/Asservissement (8, 16)	Surveillance étroite (7, 15)
fc-FI-fr	Régulation/Restauration (10, 12)	Inaction totale (9)		
fc-fi-fr	Régulation/Restauration (2, 3, 4) Régulation/Relaxation (20)	Inaction totale (1)	Maîtrise/Asservissement (8, 20)	Surveillance étroite (7)
fc-fi-FR	Restauration/Régulation (11)			
FC-fi-FR	Régulation/relaxation (2)	Inaction totale (1, 17)		

Tableau 4- 2 Grille d'aide à la décision –
Choix des interventions selon la nature de l'écosystème et
selon l'évolution de son état dans le temps suite à une perturbation

Caractéristiques fonctionnelles de l'écosystème :

FC	Fortes capacités d'adaptation vers une trajectoire normale
fc	Faibles capacités d'adaptation vers une trajectoire normale
FI	Forte inertie
fi	Faible inertie
FR	Forte résilience
fr	Faible résilience

Toutes les données ont été analysées en confrontant les deux typologies : la typologie des problèmes environnementaux et la typologie des solutions. À travers l'explication qui consistait à recommander les interventions adéquates en fonction de l'évolution de l'état de l'écosystème soumis à une perturbation (notre modèle), nous avons pu retrouver des cas singuliers auxquels s'appliquaient une solution précise. À partir de cette analyse et de la grille de synthèse, nous allons discuter de l'ensemble de ces résultats : ce sera l'objectif du chapitre 5.

CHAPITRE 5

DISCUSSION

La confrontation de la typologie des problèmes environnementaux et de la typologie des interventions nous a permis de mettre en forme un outil d'aide à la prise de décision, créé notamment pour accélérer et améliorer le processus de résolution de problèmes environnementaux. Compte tenu que cet outil est représentatif des types d'écosystèmes soumis à une perturbation moyenne et continue, pouvons-nous pour autant en déduire quelques affirmations sur la réalité des écosystèmes soumis aux perturbations anthropiques aujourd'hui? D'autre part, cet outil répond-il vraiment au besoin de faciliter la prise de décision? L'objectif de ce cinquième chapitre est de répondre à ces questions par le biais de l'interprétation des résultats.

5.1 L'apport d'une grille de référence pour accélérer et améliorer le processus de résolution de problèmes environnementaux

5.1.1 Interprétation des résultats

La première remarque qui pourrait être faite est relative au tableau 4.2. À *posteriori*, il n'est pas possible d'établir une corrélation entre le(s) type(s) d'intervention recommandé(s) et les caractéristiques déduites de l'écosystème (capacité à tendre vers la trajectoire souhaitée, inertie et résilience). En effet, bien que les écosystèmes à faible inertie et à faible résilience représentent la majorité des cas, leurs caractéristiques fonctionnelles ne suffisent pas pour recommander une intervention. En effet, aucune combinaison des trois fonctions que nous avons supposées à travers l'analyse des modèles, ne permet d'en déduire une intervention spécifique. Cependant, on remarque tout de même que la fonction liée à la capacité de l'écosystème à tendre vers la trajectoire désirée serait l'élément important dans le choix de l'intervention. En effet tel que l'illustre le tableau 2, les faibles capacités d'un écosystème à

tendre vers la trajectoire souhaitée correspondent à la recommandation d'une restauration et d'une régulation, tandis que les mêmes capacités mais fortes correspondent à une recommandation d'une relaxation et d'une régulation. Celle-ci s'est effectivement avérée déterminante pour choisir entre la restauration et la régulation. Toutefois, ce serait une erreur de se baser uniquement sur cet aspect.

Mais pouvons-nous pour autant affirmer que seules les tendances d'évolution des écosystèmes permettent un diagnostic des interventions? Oui, parce que c'est la nature de la perturbation mise en relation avec les caractéristiques fonctionnelles de l'écosystème qui permettent de générer une tendance d'évolution. Ainsi, cette grille apparaît crédible si l'on s'appliquait, dans une recherche ultérieure, à la confronter à des cas réels. En effet, suite à l'analyse d'un écosystème, et plus précisément suite à l'identification de l'effet de la perturbation sur l'écosystème, il est possible d'obtenir une tendance d'évolution. En confrontant ces tendances à la grille de référence, la connaissance des choix d'intervention à faire est rapide.

Parmi les tendances d'évolution, la première période passé/présent a été déterminante dans la prise de décision d'un choix d'intervention. Nous avons pu constater que l'analyse des modèles et la prise de décision pour recommander une intervention ont largement reposé sur les données du passé. Toutefois, aucune intervention n'a pu être entièrement déterminée sur la simple analyse du passé. Le choix de l'intervention est basé sur l'ensemble de l'évolution de l'état de l'écosystème : du passé au futur prévu. Ainsi, c'est sur la particularité du cas que se base la prise de décision et à chaque cas revient une intervention spécifique.

À partir de ces tendances d'évolution, nous avons pu identifier des groupes de problèmes suivant leur situation dans le temps : problèmes présents, futurs ou absence de problème.

Nous avons déjà auparavant fait la distinction entre les interventions destinées aux problèmes du présent (inaction totale, régulation, restauration et relaxation) et aux problèmes du futurs (maîtrise et asservissement).

Il apparaît également que la connaissance du futur a été capitale dans le choix de l'intervention comme l'illustre les cas de problèmes environnementaux dont la situation présente est non satisfaisante et la situation future est satisfaisante. Nous avons suggéré une inaction totale. Parfois, intervenir dans le présent pour inverser la tendance d'évolution de

l'écosystème aurait pu s'avérer un mauvais choix et aurait pu accentuer la dégradation de l'état de l'écosystème alors que celui-ci était déjà en train de s'auto-organiser sans que nous puissions distinctement nous rendre compte des changements (changements continus imperceptibles à l'échelle humaine).

D'autre part, les situations présente et future satisfaisantes, que nous avons définies comme des situations qui ne représentent pas un problème environnemental, devraient justement faire l'objet d'une plus grande attention. Nous avons recommandé pour plusieurs cas (tels les cas 6, 15 et 22), de surveiller étroitement ces écosystèmes dont l'état se dégrade tout en demeurant dans une situation satisfaisante. Ce sont ces types de situations pour lesquelles il serait possible d'intervenir, car elles pourraient représenter un problème potentiel. Encore une fois, la situation future est déterminante dans le choix de l'intervention.

Ce que l'on peut également extraire de cette analyse, c'est qu'il y a deux niveaux dans le choix d'une intervention :

1) Le premier est que tous les choix d'intervention ont été basés sur une analyse rigoureuse et que toutes les recommandations ont été faites sur la comparaison des risques encourus suite à l'intervention, après avoir au préalable choisi tous les types d'intervention qui convenaient au type de problème. Ainsi, suite à l'explication, voici ce que l'on pourrait ajouter au sujet de certaines interventions présentées dans la section 3.1.4 :

- L'inaction totale est une intervention qui est nécessaire lorsque la situation présente est non satisfaisante et lorsque la situation future prévue s'améliore pour atteindre une situation satisfaisante. Bien souvent, on retrouve des systèmes qui ont de fortes propriétés homéostatiques puisqu'ils retrouvent leur équilibre d'eux-mêmes en contrecarrant l'effet de la perturbation. Dans d'autres cas, on retrouvera des écosystèmes qui peuvent être stimulés par la perturbation. Ce type d'intervention, bien qu'il ne requiert aucune intervention à proprement parler, doit être accompagné d'une surveillance étroite de l'écosystème dans la mesure où certains effets «secondaires» pourraient se manifester sur le long terme (voir tableau 4.2).

- Pour la relaxation, nous allons très souvent retrouver des systèmes qui prennent une trajectoire pathologique au fur et à mesure qu'ils accumulent la perturbation, sans arriver à

l'intégrer suffisamment pour garder leur trajectoire vers l'équilibre souhaitable. Lorsque l'on compare dans le temps les données du système avec les données de la variable représentative de la perturbation, on peut généralement observer que les deux courbes induisent une relation de cause à effet. L'arrêt ou la diminution de la cause qui endommage et participe directement à la dégradation du système peut se révéler être la meilleure intervention lorsque le système montre des signes de progression vers l'état pathologique ou d'adaptation non suffisante à la perturbation.

La relaxation est une intervention qui engendre à priori très peu de conséquences dans la mesure où nous n'intervenons pas sur l'écosystème, mais sur son environnement (c'est-à-dire sur les flux d'entrée du système). Néanmoins, dans le cas d'une optimisation, il est très recommandé de surveiller étroitement le système.

- La régulation : En établissant les prévisions après intervention, on obtient un système stable maintenant une trajectoire artificielle. Le système doit être constamment surveillé. Il s'agit d'une intervention peu recommandable dans la mesure où elle engendre de grandes incertitudes quant aux effets indésirables. En effet, sur le long terme, on pourrait penser que l'écosystème finit par tendre de lui-même vers une situation désirée. Il aura donc développé de fortes propriétés auto-organisatrices susceptibles de modifier l'environnement et de représenter une situation non désirée. Il est également envisageable que cette intervention affaiblisse l'écosystème sur le long terme (diminution de sa variété) et représente aussi une situation non désirée.

2) Le second niveau, lié au choix d'intervention, est que celui-ci relève bien moins de la tendance de l'écosystème que de la subjectivité du choix de la personne qui prend la décision. En d'autres termes, l'intervention est avant tout une question de choix dépendants de variables subjectives (l'éthique) et externes (économiques, politiques, etc.). Les choix d'intervention pour les problèmes du présent le montrent bien, mais le choix d'intervention des problèmes de demain sont plus éloquents encore. En effet, le choix entre la maîtrise et l'asservissement est explicite. La maîtrise privilégie, sans conteste, les écosystèmes, tandis que l'asservissement est basé sur leur modification.

Nous pouvons comprendre qu'il soit difficile de choisir une intervention tant les paramètres sont multiples (passé et futur de l'écosystème, aspects fonctionnels, mais aussi

éthique, facteurs économiques ou politiques). En élaborant cette grille de référence, nous avons retrouvé et soulevé quelques-uns des nombreux choix à faire pour prendre une décision. La grille de référence permet de constater que, selon l'évolution de l'écosystème, l'intervention n'est pas la même. Mais elle montre aussi que les effets des interventions ne sont pas les mêmes suivant le choix que nous ferons.

Ainsi, cette grille de référence apparaît comme un outil précieux d'aide à la décision quant à la rigueur du choix d'un point de vue scientifique. En effet, tous les choix ont été effectués sur un ensemble de connaissances qui tenait compte de cette vision macroscopique que l'on souhaitait intégrer. Lorsque l'on étudie un problème environnemental concret, on a de la difficulté à prendre du recul sur le problème, ce qui peut nuire à la prise de décision, mais cette grille rappelle en peu de temps les choix judicieux à faire ou à ne pas faire.

5.1.2 Limites à l'interprétation des résultats

Toutefois, ce que nous venons d'affirmer doit être nuancé pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, les limites du modèle sont, pour l'essentiel, dues à son hyper simplification. Les tendances binaires (possibilités d'évoluer soit vers un état non satisfaisant soit vers un état satisfaisant) ne peuvent que très difficilement représenter l'évolution d'un écosystème réel. La confrontation de l'évolution de l'état d'un écosystème réel avec le modèle présenté ici sera difficile, du fait du peu de possibilités d'évolution de l'écosystème. Ainsi, la simulation théorique a très peu de possibilités de correspondre aux évolutions réelles de l'état de l'écosystème, rendant alors difficile leur identification dans la grille de référence.

Ensuite, le modèle ne tient pas compte des incertitudes, lesquelles se retrouvent à différents niveaux d'analyse. En effet, l'évolution d'un écosystème est trop aléatoire et incertaine pour établir des certitudes.

La première incertitude est due aux prévisions pour évaluer le futur prévu. Bien que nous ayons inclus les trois méthodes (extrapolation, forecasting et backcasting) pour établir la prévision de l'écosystème, il demeure une incertitude liée au comportement aléatoire d'un

écosystème. Donc, nous avons recommandé des interventions sans tenir compte d'une possible incertitude d'évolution spontanée de l'écosystème.

Une autre incertitude également serait celle liée aux conséquences de la perturbation et de l'intervention. L'imprévisibilité d'un écosystème ne peut garantir la dépendance ou l'indépendance à une perturbation. C'est même quasiment impossible. Il en est de même pour les interventions que l'on fait subir à l'écosystème : ne pouvant totalement le connaître, on ne peut connaître ou même anticiper ses réactions. Et cette incertitude se renforce selon le type d'intervention choisi.

Toutes ces incertitudes non considérées altèrent les résultats. Dans un tel contexte, comment pouvons-nous imaginer établir une grille de référence pour aider à la résolution des problèmes environnementaux?

5.1.3 Recommandations

L'élaboration d'une grille de référence est un outil qui peut être amélioré. Ne peut-on pas imaginer la création d'un outil qui intégrerait mieux la complexité et surtout l'incertitude des écosystèmes? Ne pourrait-on pas imaginer, par exemple, la création d'un logiciel où l'on pourrait entrer plusieurs variables pour simuler l'évolution d'un écosystème et déterminer rapidement l'intervention adéquate? Ces variables pourraient être les quelques caractéristiques fonctionnelles et structurales connues de l'écosystème ou les relevés dans le temps des différents indicateurs d'un écosystème; mais on pourrait imaginer aussi intégrer à cet outil des variables externes (données économiques, politiques, etc.) et des variables plus subjectives comme le choix d'une éthique, selon le futur que l'on désirerait implanter. La création d'un outil global permettrait de faire ce qu'on ne sait pas faire : regarder de haut et regarder loin. Il constituerait un outil incontournable pour la prise de décision. De plus, le recours à l'ordinateur pour modéliser un écosystème s'avère être pertinent et, de surcroît, c'est un outil de plus en plus utilisé.

5.2 Limites de la recherche

Il réside, dans cette recherche, une faille méthodologique, laquelle permet sérieusement de mettre en doute l'élaboration de cette grille de référence. Nous avons mentionné que le recours à la méthode systémique était une condition *sine qua non* au traitement des problèmes complexes. Mais, nous sommes partis de la représentation d'un écosystème abstrait, représentatif de tous les écosystèmes. Cependant, la création d'un système par un modèle nécessite trois variables indispensables pour représenter artificiellement la dynamique d'un écosystème : son historique, sa fonction, et sa structure. Or, nous nous sommes uniquement basé sur la variable historique : il s'agit d'une partie seulement de l'élaboration du modèle. Précisons que nous ne pouvions créer un tel modèle car les données n'existent pas et, d'ailleurs, ce type de données est-il vraiment possible à recueillir? En fait, il faudrait modéliser bon nombre d'écosystèmes pour les généraliser et la tâche serait difficile et surtout, longue.

Cette recherche manque beaucoup de moyens tels du temps, des études de plusieurs écosystèmes, des connaissances cybernétiques, pour voir la réalisation d'une grille de référence plus complète pour la résolution des problèmes environnementaux.

C'est en grande partie pour cette raison méthodologique que l'on peut mettre un "bémol" sur la pertinence de la grille de référence.

5.3 Perspectives d'avenir

Si les écosystèmes - tel que nous l'avons mentionné - sont des écosystèmes complexes et de surcroît complexifiants, et si la complexité ne peut être entièrement connue, alors leur connaissance ne sera jamais possible, même avec le temps (puisque celui-ci est néguentropique).

Avec une telle remarque, comment est-il possible de continuer à perturber les écosystèmes d'une façon de plus en plus intensive? L'écosystème mondial pourrait-il représenter un problème environnemental futur? Est-il résilient? Avec ou sans inertie? Devant l'incertitude, comment réagir? Au-delà de la difficulté de déterminer une

intervention, à quel moment devons-nous agir? C'est le cœur de la difficulté en ce qui concerne la résolution des problèmes futurs. Nous ne pouvons pas connaître entièrement les écosystèmes, donc nous ne pouvons pas connaître précisément leur évolution : alors, nous n'agissons pas.

Nous avons souvent une vision des événements qui est prédéterminée. Or, suivant cette logique, c'est seulement lorsque l'état des divers écosystèmes constituera un problème du présent qu'il sera possible de réagir. Mais les interventions proposées dans le présent ne sont que des interventions réactives et ne favorisent pas un changement profond; leur vocation est de répondre linéairement à un problème, à un ensemble de perturbations endommageant l'écosystème.

L'exercice du doute sceptique est-il une solution en soi? Nous ne pouvons pas, en effet, suspendre tout jugement et toute décision sous le seul prétexte que nous faisons face à une certitude : celle de ne jamais pouvoir connaître entièrement un écosystème.

Dans un tel contexte, comment aller de l'avant? Il faut reconnaître que parfois nous avons comme seul choix celui de prendre des décisions sans connaître à fond le problème, comme l'illustre la problématique des problèmes environnementaux. Il est malgré tout indispensable de faire des choix continuellement, tel que nous l'avons expliqué, pour résoudre des problèmes environnementaux. C'est le principe de l'amélioration continue.

La première décision doit être relative à l'avenir que l'on souhaite créer. Un nouvel avenir, un nouveau développement nécessitent une intervention intégrée, puisqu'ils impliquent une intervention globale sur tous les systèmes connexes (sociale ou économique par exemple) afin de ne pas menacer d'irréversibilité les écosystèmes au sein desquels l'humain évolue. C'est la maîtrise qui correspond le mieux à ce modèle de développement. Et les systèmes connexes étant eux-mêmes des systèmes complexes, on comprend alors que le temps ne joue pas en notre faveur. La création d'un nouvel avenir n'est-elle pas, ni plus ni moins, l'aboutissement d'une amélioration continue?

Cela nécessite un changement de la façon de penser, puis de la façon de procéder. Des recherches sur la résolution de problèmes environnementaux doivent être poursuivies pour que progressivement soit élaborée une méthode qui s'intégrera à cette nouvelle façon de penser : penser dans la complexité.

CHAPITRE 6

CONCLUSION

Les progrès incontestables enregistrés en matière d'environnement seront vraisemblablement réduits à néant par le rythme et l'ampleur de la croissance économique au niveau mondial, par l'aggravation générale de la pollution du milieu et la dégradation accélérée des ressources renouvelables de la planète. En d'autres termes, la résolution de problèmes environnementaux n'est pas suffisamment efficiente pour permettre d'inverser la tendance d'évolution écologique de la planète vers laquelle nous semblons tendre inévitablement. Or, il s'avère que ce ne sont pas tant les solutions qui fassent défaut, que la façon de penser un problème environnemental et de le résoudre. Dans un tel contexte, nous nous sommes demandé comment il était possible d'améliorer le processus de résolution de problèmes environnementaux.

Nos objectifs étaient de développer une méthodologie générale de la résolution de problèmes environnementaux qui tiendrait compte de leurs aspects complexes et d'élaborer un outil d'aide à la prise de décision.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons montré qu'un problème environnemental était un problème complexe et qu'il était nécessaire de tenir compte de cette dimension pour pouvoir le résoudre. Ensuite, nous avons élaboré une méthodologie pour la résolution de problèmes environnementaux, en y intégrant les connaissances liées à la complexité et à la systémique et, en se basant sur les méthodologies générales de résolution de problèmes déjà existantes, issues pour la plupart, des sciences de la gestion.

Il s'agissait, ensuite, de construire un outil d'aide à la prise de décision. Nous nous sommes donc basés sur certains outils de la méthode systémique pour élaborer un modèle hyper simplifié représentant les différentes possibilités d'évolution d'un écosystème dans le temps. Ce modèle devait représenter des types de problèmes environnementaux, présents comme futurs. Nous avons, également, élaboré une typologie des différentes possibilités d'intervention sur un écosystème pour résoudre un problème environnemental. Finalement, nous devons analyser les différents modèles et recommander une ou des intervention(s) en fonction des tendances d'évolution de l'écosystème représenté.

Suite aux résultats, deux remarques ont pu être énoncées.

Premièrement, ceux-ci ont montré que la méthodologie pour la résolution de problèmes environnementaux s'avère essentielle dans toute démarche qui viserait leur résolution. Nous avons, notamment, mis l'accent sur le principe de l'amélioration continue. En effet, un problème environnemental ne pouvant être entièrement connu, ne peut être entièrement résolu. Celui-ci apparaît donc comme une situation qui doit être continuellement améliorée dans le temps.

Deuxièmement, les résultats ont montré que l'élaboration d'un outil global d'aide à la prise de décision était réalisable et qu'il permettait, effectivement, en tenant compte de l'évolution de l'écosystème dans le temps, de faire un choix éclairé quant au type de solution adéquat.

Cela dit, l'élaboration d'une méthodologie pour la résolution des problèmes environnementaux pourrait être améliorée. En effet, comme un problème environnemental est un problème interdisciplinaire, il peut se résoudre sous de multiples aspects tels les aspects éducationnels, politiques ou économiques. Ainsi, il apparaît nécessaire d'intégrer et de relier à cette méthodologie générale, un ensemble de méthodologies plus spécifiques relatives aux disciplines à travers lesquelles on aborde un problème environnemental.

Concernant l'outil d'aide à la prise de décision, celui-ci a été construit sans se baser sur un ou plusieurs cas concrets d'écosystème et en ne tenant pas compte des diverses incertitudes liées à la nature de l'objet étudié. En ce sens, son application s'avère difficile dans le cas où l'on déciderait de l'appliquer concrètement.

Toutefois, nos objectifs ont été atteints, puisque nous avons réussi à élaborer une méthodologie générale de la résolution des problèmes environnementaux en intégrant de nouvelles connaissances. De plus, l'élaboration d'une grille de référence pour améliorer le processus de résolution de problèmes environnementaux s'est révélée comme un outil pertinent, bien qu'il nécessite une amélioration. En effet, nous pourrions imaginer un outil qui intégrerait mieux la réalité des écosystèmes et dont les moyens d'y recourir se baseraient plus sur la modélisation assistée par ordinateur.

Tous ces résultats montrent l'importance de poursuivre la recherche sur la résolution de problèmes environnementaux et de se donner les moyens de faire les bons choix.

Il est impensable, en effet, de laisser la situation évoluer telle quelle. Nous avons mis en avant que la peur de prendre une mauvaise décision pouvait disparaître grâce à un outil qui différencie les décisions où l'incertitude est la plus faible, des décisions susceptibles d'engendrer des incertitudes plus fortes sur le moyen et long terme.

Concernant spécifiquement les interventions, nous avons défini la maîtrise comme l'intervention répondant le mieux aux problématiques actuelles. En effet, les menaces d'une détérioration future de l'écosystème pourraient ne jamais se produire, si, maintenant, nous agissions en son sens. Rappelons que celle-ci se réclame être une intervention sur l'ensemble des systèmes connexes (socio-économiques) en commençant par résoudre les causes les plus évidentes jusqu'aux causes les plus profondes. Ne pourrions-nous pas y voir, en extrapolant, que cette intervention rappelle la nécessité d'une responsabilisation environnementale tant collective qu'individuelle? Chaque individu, chaque organisation participe et est responsable - dans une moindre mesure - de l'accroissement des problèmes environnementaux, et chacun pourrait inverser la tendance écologique actuelle. Ce changement pourrait se faire à la condition de définir un futur commun et de le décider. La décision entraînant irrémédiablement l'action, nous pourrions espérer voir une amélioration et donc une accélération de la résolution des problèmes environnementaux. De plus, la définition d'un nouveau futur laisse entrevoir la possibilité de changer et d'améliorer nos interventions : c'est le principe de l'amélioration continue!

D'autre part, cette notion ne sous-entend-elle pas finalement une modification profonde de nos modes de vie? Car, compte tenu de tout ce qui a été dit, pour améliorer le processus de résolution de problèmes environnementaux, il semblerait que la maîtrise réclame un changement radical de nos façons de vivre : un mode de vie plus raisonné au regard de l'ensemble de la planète.

APPENDICE A

NOTES SUR LE SECOND PRINCIPE DE THERMODYNAMIQUE

Le texte qui suit est basé d'après l'ouvrage *Penser et agir dans la complexité* de Donnadiou et Karsky (2002).

La thermodynamique est cette branche de la physique qui s'intéresse aux phénomènes liés à la chaleur et à l'énergie. Elle repose sur deux principes fondateurs :

1. Les diverses énergies existant dans la nature (chimie, électrique, lumineuse, mécanique, calorifique ou chaleur) peuvent se transformer l'une dans l'autre suivant certaines proportions définies et stables : c'est le principe d'équivalence. Ainsi, l'énergie mécanique (ou travail) peut se transformer en chaleur, et réciproquement suivant la proportion :

1 calorie équivaut à **4,18 joules**

(unité de chaleur) (unité de travail)

2. Mais cette transformation ne se réalise pas avec la même facilité dans tous les cas de figure. Il existe des énergies "nobles" (électriques, mécaniques) et des énergies "pauvres" (chaleur). Et, s'il est toujours aisé de transformer avec un bon rendement (de l'ordre de 90% par exemple) une énergie noble en chaleur, il est en revanche plus difficile de réaliser l'inverse et de transformer de la chaleur en travail. Les rendements sont alors médiocres (de l'ordre de 25% par exemple pour la machine à vapeur) et de surcroît, il faut disposer d'une source froide où viennent se perdre les calories vides inutilisées.

Cela constitue le second principe de la thermodynamique ou le principe de Carnot-Clausius.

À partir de ces deux principes, on peut alors se livrer à des raisonnements d'une extrême généralité sur l'évolution des systèmes physiques existant dans la nature, systèmes que l'on va

caractériser par des fonctions d'état, c'est-à-dire des grandeurs qui ne dépendent que de l'agencement interne du système au moment de l'observation (son état) indépendamment du chemin qui a été suivi pour atteindre cet état. Une première fonction d'état s'introduit simplement; c'est l'énergie interne U qui mesure en quelque sorte le potentiel énergétique total, en diverses énergies, dont dispose le système. Ainsi, en l'absence d'échanges avec l'extérieur, U reste constant. Mais, pour les besoins de leurs opérations, les physiciens, et surtout les ingénieurs, ont été conduits à introduire une seconde fonction d'état, l'entropie S qui, d'un point de vue énergétique, joue par rapport à la température le même rôle que le volume d'eau dans une installation hydraulique par rapport à la hauteur de chute. Sa définition mathématique est la suivante :

Q (Quantité de chaleur échangée lors d'une transformation réversible) = ΔS (variation d'entropie lors de la transformation) $\times T$ (Température de la transformation supposée isotherme).

On dit pour cette raison que l'entropie est une grandeur extensive. Elle possède une propriété intéressante : lors d'une transformation réelle où le système échange de l'énergie avec le milieu extérieur, sa variation est toujours supérieure à ce qu'elle serait lors d'une transformation théorique, dite transformation réversible, infiniment lente et progressive, conduisant à la même température finale. Pour cette raison, l'entropie repère, en quelque sorte, la perfection d'une transformation, ce qui est bien commode pour mesurer l'efficacité des machines thermiques. On en tire également une conséquence de grande portée théorique relative à l'évolution d'un système fermé soumis à des transformations irréversibles : n'échangeant ni chaleur ni travail avec son environnement, un tel système ne peut voir que croître son entropie, jusqu'à atteinte d'un maximum.

Ainsi définie par ses manifestations extérieures, l'entropie serait une variable utile mais bien mystérieuse et il a fallu attendre le grand physicien Boltzmann pour lui trouver enfin, au début du XX^e siècle, une signification plus concrète. Par sa célèbre équation $S = k \log W$, Boltzmann établit une relation entre l'entropie S et l'état de désordre du système repéré par le nombre W de configurations ou arrangements que peuvent prendre les divers corpuscules ou éléments composant le système à l'occasion de leur mouvements. Si les éléments sont assujettis à demeurer dans une structure ou organisation intangible, comme pour un cristal, W est faible. Si, à l'inverse, les éléments ont la faculté de changer de position à chaque instant, comme dans un gaz, W est grand. Mais laissons la parole à Boltzmann lui-même : «Le principe de Carnot-Clausius, dans son application aux phénomènes irréversibles, prend alors une signification presque intuitive : si

l'entropie d'un système isolé ne peut pas décroître, c'est parce que l'ordre ne peut jamais s'établir spontanément. L'ordre exige un choix concerté. Le hasard, qui joue nécessairement dans des assemblées d'un nombre immense de molécules, ne peut produire qu'un désordre de plus en plus grand. L'entropie maximum correspond au désordre maximum. »

Ainsi, avec l'entropie, l'humain se serait doté du moyen de mesurer le désordre et aurait énoncé une loi d'évolution absolument générale quant aux systèmes physiques et à l'univers lui-même. Ce dernier étant par définition un système fermé, ne peut évoluer que dans le sens de la croissance de son entropie, c'est-à-dire vers un état de chaos général où toutes les configurations sont équiprobables.

GLOSSAIRE

Auto-organisation. L'auto-organisation est la propriété pour un système de modifier spontanément sa structure (croissance), quand les conditions externes changent. Ces changements structuraux ont pour effet de maintenir la stabilité du système et de lui permettre d'atteindre un niveau supérieur de complexité. L'auto-organisation est un processus irréversible. Les systèmes vivants sont des systèmes ouverts qui échangent constamment avec leur environnement. Pour survivre, ils doivent être capables d'apprendre et de modifier leur structure.

La capacité à l'auto-organisation n'est pas l'apanage exclusif des systèmes vivants. Ilya Prigogine a décrit, à travers la notion de «structure dissipative» l'auto-organisation des systèmes dans le domaine de la chimie (Yatchinnovsky, 2004).

Causalité circulaire. Cette notion est issue de la cybernétique; elle s'oppose à celle de causalité linéaire. Il s'agit d'une chaîne causale et les effets se succèdent jusqu'à retourner au premier élément de cette chaîne par un mécanisme de rétroaction, pour y introduire un changement, ou le renforcer, ou l'inhiber. Elle s'applique donc à tous les systèmes dont les éléments coévoluent au travers de phénomènes d'adaptation, de crise de stabilité ou d'homéostasie (Yatchinnovsky, 2004).

Causalité linéaire. On dit habituellement d'une chaîne causale qu'elle est linéaire lorsque n'y entrent pas en jeu les phénomènes de rétroaction caractéristiques de la causalité circulaire à laquelle elle s'oppose. Ici, une cause A entraîne un effet B, lequel entraîne un autre effet C. La causalité linéaire est celle qui s'impose le plus facilement à notre esprit lorsque nous avons à expliquer une situation ou une prise de position (Yatchinnovsky, 2004).

Cybernétique. Ce terme définit le champ très large des théories concernant les mécanismes de contrôle de l'information et de la communication. Il a été introduit en 1948 par Norbert Wiener en ce qui concerne aussi bien les organismes vivants, les machines que les structures sociales. Un ensemble de ces études a d'abord été conduit par des mathématiciens et des physiciens qui se sont penchés sur les mécanismes de transformation et de conservation de l'énergie ainsi que sur les phénomènes de régulation des systèmes (Yatchinnovsky, 2004).

Entropie. L'entropie d'un système caractérise son degré de désordre. Ce terme, ainsi que celui de la néguentropie, est emprunté à la thermodynamique (Annexe 2).

Homéorhésie. Alors que l'homéostasie est le maintien de l'état d'un système, l'homéorhésie est le maintien stable des flux d'entrée et de sortie du système.

Homéostasie. Depuis plus d'un siècle, avec Claude Bernard, ou avec W.B. Cannon, la physiologie a dû très rapidement utiliser des modèles répondant à la complexité, c'est-à-dire à

l'organisation du désordre. Le maintien d'un système en un état stable a vu s'éclairer son sens avec la venue de la cybernétique de Nobert Wiener et la description de la rétroaction négative, traduisant la régulation et le contrôle de l'énergie. C'est le frein à l'emballement du système, par réintroduction de l'information sur l'état de celui-ci (correction par l'erreur elle-même). Le thermostat est l'objet matériel et technique qui illustre le mieux ces réponses stabilisatrices (Yatchinnovsky, 2004).

Inertie. Résistance que les systèmes opposent au mouvement et qui varie en fonction de leur nature (Larousse, 2003).

Résilience. En physique, la résilience est le rapport de l'énergie cinétique absorbée, nécessaire pour provoquer la rupture d'un métal, à la surface de la section brisée (Larousse, 2003). Pour un écosystème, la résilience est relative à sa capacité d'absorption des effets de la perturbation.

RÉFÉRENCES

- BERGER, G. 1957. «Sciences humaines et prévision». *Revue des Deux Mondes*, n° 3, (février), pp. 417-426.
- BERGER, G. 1958. «L'attitude prospective» in *Prospective*, Cahier n° 1, mai 1958, pp. 1-10.
- BERQUE, A. 1996. *Être humain sur la terre*. Paris : Gallimard, Coll. Le débat.
- CANGUILHEM, G. 1966. *Le normal et le pathologique*. 2^e éd. Paris : Presses Universitaires de France.
- CLÉMENT, E., DEMONQUE, C., HANSEN-LOVE, L. et KAHN, P. 1994. *Pratique de la philosophie*. Paris : Hatier
- CRÉPIN, D. et ROBIN, R. 2001. *Résolution de problèmes : Méthodes – outils de première et deuxième générations*. Paris : Éditions d'Organisation.
- DE ROSNAY, J. 1975. *Le macroscopie : Vers une vision globale*. Paris : Le Seuil. Coll. Point.
- DEMING, W. E. 1988. *La qualité: la révolution du management*. Paris : Économica
- DONNADIEU, G. et KARSKY, M. 2002. *La systémique, penser et agir dans la complexité*. Paris : Liaisons.
- ETHERINGTON, M. (Conseil de l'Europe) 2003. Mondialisation et développement durable. Rapport de la commission de l'environnement, de l'agriculture et des questions territoriales. <http://assembly.coe.int/Mainf.asp?link=http://assembly.coe.int/Documents/WorkingDocs/doc03/FDOC9660.htm>
- FOLGER H. S. & LEBLANC S. E. 1995. *Strategies for Creative Problem Solving*. Upper Saddle River: PTR Prentice Hall.
- FORTIN, R. 2000. *Comprendre la complexité: Introduction à la pensée d'Edgar Morin*. Paris : L'Harmattan.
- LAROUSSE. 2003. *Le petit Larousse. Dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française*. Nouvelle édition, Paris : Larousse,
- LE GALLOU, F. et BOUCHON-MEUNIER, B. 1992. *Groupe pour l'enseignement de la systémique théorique et appliquée*. Paris : Technique et Documentation.

- LESOURNE, J. 1974. *Les systèmes du destin*. Paris : Dunod
- MORIN E. 1977. *La méthode : De la nature de la nature*. t.1, Paris : Le Seuil
- PAEHLKE, R. 1995. *Conservation and Environmentalism, An Encyclopedia*. New York, Garland
- PRADES, 1995. *L'éthique de l'environnement et du développement*. Paris : Presses Universitaires de France. Coll. Que sais-je ?.
- PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement). 2000. *L'avenir de l'environnement mondial*. (GEO-2). Hertfordshire, (England): Earthprint
- WIENER N. 1962. *Cybernétique et société : L'usage humain des êtres humains*. Paris : Union Générale d'Édition; coll. 10/18.
- YATCHINNOVSKY, A. 2004. *L'approche systémique : pour gérer l'incertitude et la complexité*. Paris : ESF. Coll. Formation permanente.
- ZIN, J. 2005. «*L'énigme de l'émergence*», *Sciences et Avenir*, hors-série 143, juillet/août 2005, pp. 12-15

BIBLIOGRAPHIE

LIVRES

ATLAN, H., *Entre le cristal et la fumée*. Paris : Le Seuil, 1986, 146p.

ALPHANDERY, P., BITOUN, P., DUPONT, Y. *L'équivoque écologique*. Paris : La découverte, 1993, 273p.

BAK, P. *Quand la nature s'organise. Avalanches, tremblements de terre et autre cataclysmes*. Paris : Flammarion, 1999, 284p.

BATESON, G. *Vers une écologie de l'esprit*. Paris : Le Seuil, 1977, 163p.

BATESON, G. *La nature de la pensée*. Paris : Le Seuil, 1984, 123p.

BARROW, J., D. *Impossibility. The Limits of Science and the Science of Limits*. New-York: Oxford University Press, 1988, 296p.

BENKIRANE, R. *La complexité, vertiges et promesses*. Saint-Amand-Montrond (France) : Le Pommier, 2002, 419p.

BERGÉ, P., POMMEAU, Y., et DUBOIS-GANCE, M. *Des rythmes du chaos*. Paris : Odile Jacob, coll. Opus, 1994, 294p.

BERGER, G. *Étapes de la prospective*. Paris : Presses Universitaires de France, 1967, 147p.

BOURG, D. *Planète sous contrôle*. Paris : Textuel, 1998, 131p.

CAZENAVE, M. (sous la direction de). *Aux frontières de la science : Dictionnaire de l'ignorance*. Paris : Albin Michel, 1998, 288p.

COVENEY, P. et HIGHFIELD, R. *Frontiers of Complexity. The Search of Order in a Chaotic World*. New-York: Fawcett Colombine, 1995, 488p.

DAUPHINÉ, A. *Les théories de la complexité chez les géographes*. Paris : Anthropos, Coll. Géographie, 2003, 247p.

DELAHAYE, J.-P. *Information, complexité et hasard*. Paris : Hermès Sciences Publicat., 2^e éd., 1999, 275p.

- DEMING, W. E. *La qualité: la révolution du management*. Paris : Économica, 1988, 357p.
- DESCARTES. *Discours de la méthode*. 2000. Paris : Flammarion, 2000. 186p.
- DUPUY, J.-P. *Aux origines des sciences cognitives*. Paris : La Découverte, coll. La Découverte/Poche, 1999, 187p.
- FUSTIER, M. *La résolution de problèmes : méthodologie de l'action*. Montréal, Gaetan Morin 1977, 109p.
- GLEICK, J. *La théorie du Chaos*. Paris : Flammarion, coll. Champs, 1991, 431p.
- GRIBBIN, J. *Une brève histoire des sciences*. Paris : Larousse, 1999.
- HOSOTANI, K. *Guide qualité de résolution de problème*; 1997, Paris : Dunod
- LE MOIGNE, J.-L. *La théorie du système général*, Paris : Presses Universitaires de France, 1984
- LE MOIGNE, J.-L. *La modélisation des systèmes complexes*. Paris : Dunod, 1990, 224p.
- LEWIN, R. *Complexity. Life at the Edge of Chaos*. Chicago: University of Chicago Press, seconde édition, 2000, 242p.
- MASSÉ, P. *Le plan ou l'anti-hasard*. Paris: Gallimard, 1965, 337p.
- MELEZE, A. *Approche systémique des organisations*. Éditions d'organisation, 1995
- MIQUEL, P.-A. *Comment penser le désordre?* Paris : Fayard, 2000, 317p.
- MORIN E. *La méthode : La vie de la vie*. t.2. Paris : Le Seuil, 1980, 312p.
- *La méthode : La Connaissance de la connaissance*. t.3 Paris : Le Seuil, 1986, 432p.
- *La méthode. Les idées*. t.4. Paris : Le Seuil, 1991, 418p.
- MORIN, E., LE MOIGNE J.-L. *L'intelligence de la complexité*. Paris : L'Harmattan, 2003, 327p.
- PRIGOGINE, I. et STENGERS, I. *La nouvelle Alliance. Métamorphose de la science*. Paris : Gallimard, coll. Folio, seconde édition, 1986, 439p.
- PRIGOGINE, I. *De l'être au devenir*. Liège : Alice, 1999, 89p.
- SALOMON, J.-J., REEVES H. & STENGERS I. *Du cosmos à l'homme : comprendre la complexité*. L'Harmattan, 1994, 384p.
- SIMON H. *La sciences des systèmes*. EPI, 1979, 173p.

VARELA, F. *Autonomie et connaissance : essai sur le vivant*. Paris : Le Seuil, 1978, 238p.

ARTICLES

GALLAGHER, R. et APPEZELLER, R. «Beyond Reductionism» in *Science*, vol. 284, N° 5411, avril 1999, p.79

GOLDENFELD, N. et KADANOFF, L., P. «Simple lessons from Complexity» in *Science*, vol. 284, N° 5411, avril 1999, p.87-89

ZIEMELIS, K. «Complex Systems», *Nature*, vol.410, N° 6825, mars 2001, p.281-284

PUBLICATIONS GOUVERNEMENTALES

PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement). *L'avenir de l'environnement mondial* (GEO-2). Earthprint, Hertfordshire, England, 2000, 154p.

DICTIONNAIRES

LECOURT DOMINIQUE (sous la direction de), *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*. Paris : Presses Universitaires de France, coll. Quadrige, 1999, 1056p.

SOURCES ÉLECTRONIQUES

GOODWIN, B.c1998. «All for one...One for All», *New Scientist*.
www.Schumachercollege.org.uk/articles/college-articles/brian/allforone.html

GOODWIN, B. 1999. «from control to Participation Via a Science of Qualities», *ReVision*,
www.Schumachercollege.org.uk/articles/college-articles/brian/fromcontrolto.html